OPERATOR I KONSTRUKTOR BSP

Podręcznik dla operatorów
i konstruktorów dronów

Matthew Halaba
halaba.online

Materiał przeznaczony wyłącznie do legalnych, cywilnych i bezpiecznych zastosowań dronów. Zgodny z regulacjami EASA, ULC i prawem polskim.

WSTĘP

Dlaczego ten podręcznik powstał

Polskojęzycznych materiałów szkoleniowych o dronach nie brakuje. Brakuje natomiast takich, które traktują kursanta poważnie. Większość dostępnych treści to fragmenty blogów, skrócone kursy YouTube lub przepisane specyfikacje producentów. Uczą obsługi konkretnego urządzenia. Nie uczą rozumienia. Gdy sprzęt zachowuje się inaczej niż w filmiku, użytkownik nie wie, co zrobić. Ten podręcznik powstał z innego założenia: operator, który rozumie, dlaczego coś działa, poradzi sobie z każdym sprzętem i każdą sytuacją. Operator, który tylko naśladuje – prędzej czy później rozbije drona, naruszy przepisy albo skrzywdzi kogoś nieświadomie. 200 stron to nie przesada. To minimum, żeby uczciwie przeprowadzić człowieka od zera do poziomu, na którym może świadomie latać, budować, diagnozować i podejmować bezpieczne decyzje operacyjne. Każde skrócenie tego materiału byłoby nieuczciwością wobec kursanta i wobec ludzi latających w tej samej przestrzeni powietrznej.

Dla kogo jest ten podręcznik

Ten podręcznik jest dla ciebie, jeśli:

- Interesujesz się dronami i chcesz rozumieć je głębiej niż instrukcja obsługi.
- Jesteś hobbysta, który chce przejść na poziom świadomego operatora.
- Rozważasz pracę w sektorze inspekcji, fotogrametrii, rolnictwa precyzyjnego lub ratownictwa.
- Budujesz własne drony i chcesz rozumieć fizykę i elektronikę, a nie tylko kopiować gotowe zestawy.
- Jesteś instruktorem lub szkoleniowcem szukającym strukturalnego materiału

bazowego.

- Chcesz zdać egzamin UAVO i naprawdę rozumieć materiał, a nie tylko wykuć

testy. Nie musisz mieć żadnego wcześniejszego doświadczenia z dronami. Musisz mieć chęć myślenia.

Jak korzystać z podręcznika

Materiał jest zbudowany sekwencyjnie. Każdy rozdział zakłada znajomość poprzednich. Nie skacz do przodu, bo fizyka z Części I jest podstawą do tuningu PID z Części V, a meteorologia z Części II determinuje decyzje operacyjne z Części VI. Każdy rozdział zawiera:

```
 CELE SZKOLENIOWE     → wiesz, czego się nauczysz zanim
zaczniesz
  TEORIA              → wyjaśnienia inżynierskie + "po
ludzku"
  WZORY               → z pełnym opisem zmiennych i jednostek
  PRZYKŁADY OBLICZEŃ   → konkretne zadania z rozwiązaniami
  ĆWICZENIA PRAKTYCZNE → instrukcje do wykonania na
sprzęcie/symulatorze
  CHECKLISTY          → do odhaczenia po każdym rozdziale
  RAMKI BŁĘDÓW        → typowe pułapki opisane wprost
  PYTANIA KONTROLNE    → otwarte, wymagają myślenia
  MINI-TEST           → 5 pytań zamkniętych do
samosprawdzenia
  WNIOSKI OPERACYJNE   → maksimum 5 punktów, esencja rozdziału
```

Oceniaj swoje postępy przez KPI zawarte na początku podręcznika. Jeżeli nie zaliczasz bramki kompetencyjnej – wróć do rozdziału, nie idź dalej.

O metodyce szkolenia

Struktura tego kursu inspirowana jest podejściem stosowanym w profesjonalnych programach kształcenia operatorów systemów bezzałogowych (m.in. standardy AUVSI, ramy EASA UAS Training, praktyki stosowane przez wiodące ośrodki szkoleniowe w Europie i USA). Kluczowe zasady: Symulator przed polem. Minimum 30 godzin w symulatorze zanim wykonasz pierwszy lot rzeczywisty. To nie opcja – to warunek bezpieczeństwa twojego i innych. Bramki kompetencyjne. Nie ma „zaliczenia przez obecność". Każdy etap ma mierzalne kryteria. Jeśli ich nie spełniasz – ćwiczysz dalej. Dokumentacja bez wyjątków. Każdy lot, każda naprawa, każdy incydent trafia do dziennika. Kultura dokumentacji to kultura bezpieczeństwa. Brief i debrief. Każda sesja lotna zaczyna się od briefingu i kończy debriefingiem. Nie dlatego, że tak nakazuje regulamin – dlatego że bez analizy nie ma poprawy. Adaptacja do warunków. Procedury są punktem wyjścia, nie sztywną klatką. Świadomy operator modyfikuje plan na podstawie danych – pogody, stanu sprzętu, zmęczenia, ryzyka.

Ważne zastrzeżenia

Zakres materiału. Podręcznik obejmuje wyłącznie legalne, cywilne i bezpieczne zastosowania dronów. Nie zawiera treści dotyczących zastosowań bojowych, uzbrajania, ładunków ofensywnych ani żadnych działań niezgodnych z prawem polskim i europejskim. Aktualność przepisów. Regulacje dotyczące BSP zmieniają się dynamicznie. Podane w podręczniku przepisy EASA i ULC są aktualne na rok 2026. Przed każdą operacją komercyjną lub certyfikacyjną weryfikuj bieżący stan prawny w źródłach oficjalnych: ULC , EASA , PansaUTM . Odpowiedzialność. Autor i redaktorzy dołożyli wszelkich starań, aby informacje zawarte w podręczniku były rzetelne i aktualne. Operator ponosi pełną odpowiedzialność za bezpieczne i zgodne z prawem użytkowanie BSP.

Podziękowania

Materiał ten nie powstałby bez społeczności – konstruktorów, pilotów, inżynierów i instruktorów, którzy od lat dzielą się wiedzą w otwartych projektach: ArduPilot, Betaflight, LibrePilot, INAV, OpenTX/EdgeTX oraz wszystkich wielkich przyjaciół z Ukrainy w tym Pułku Azow. To ich zbiorowa praca jest fundamentem wiedzy zawartej w tym podręczniku. Szczególne podziękowanie dla wszystkich, którzy wspierają projekt darmowego e-learningu dronowego dla polskich użytkowników.

Struktura podręcznika – skrót

CZĘŚĆ	TYTUŁ	STRONY
I	Fundamenty	1–40
II	Meteorologia i środowisko	41–65
III	Budowa drona	66–105
IV	Łączność, fala i zakłócenia	106–125
V	Oprogramowanie i konfiguracja	126–145
VI	Operacje lotnicze	146–175
VII	Serwis, diagnostyka, KPI	176–190
VIII	Prawo, etyka, egzamin końcowy	191–200

Zaczynamy.

O projekcie e-learningowym

Ten podręcznik jest częścią większego projektu — bezpłatnej platformy e-learningowej dla polskich operatorów i konstruktorów dronów.

Interaktywny kurs, testy, symulatory i materiały wideo — dostępne bez opłat dla każdego w Polsce.

Projekt finansowany społecznościowo; w kolejnym etapie wersje językowe dla innych rynków europejskich.

Kurs

Testy

Symulatory

halaba.online · matthew@halaba.online

Wesprzyj darmowy e-learning o dronach dla Polaków

Bezpłatny kurs online dla każdego
- bez paywall, bez subskrypcji

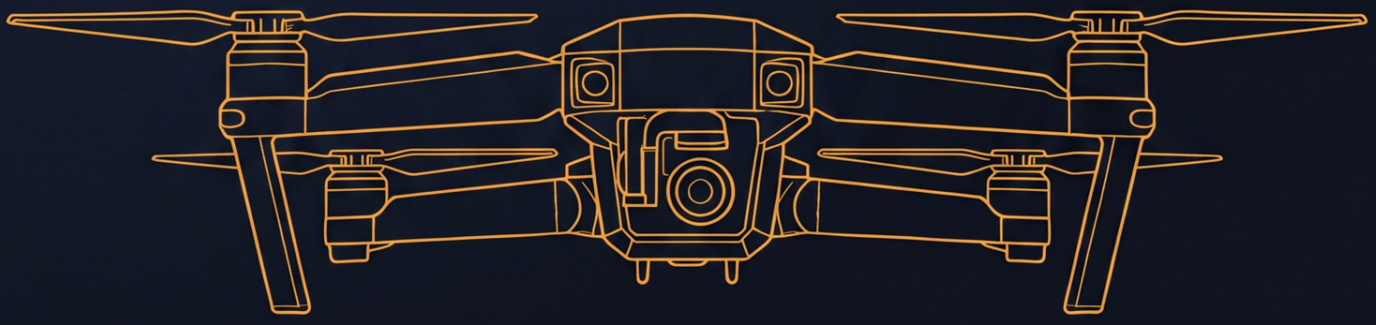
buycoffee.to/maha

Każda wpłata pomaga uruchomić bezpłatny kurs

— Matthew Halaba

halaba.online · matthew@halaba.online

CZĘŚĆ I — FUNDAMENTY



Część: I – Fundamenty
Czas nauki szacowany: 90 minut

1.0 Cele szkoleniowe

Po ukończeniu tego rozdziału kursant:

1. Definiuje terminy BSP, UAS, UAV, RPAS zgodnie z terminologią EASA i ICAO.
2. Rozróżnia kategorie operacyjne OPEN, SPECIFIC i CERTIFIED według rozporządzenia EU 2019/947.
3. Przyporządkowuje klasę C0–C6 do konkretnej platformy na podstawie masy i funkcji.
4. Klasyfikuje platformy według geometrii i wskazuje zastosowanie każdego typu.
5. Wymienia podstawowe parametry charakteryzujące platformę BSP.
6. Identyfikuje właściwą kategorię operacyjną dla podanego scenariusza misji.

1.1 Definicje prawne i techniczne

Terminologia – skąd tyle nazw?

W branży BSP funkcjonuje kilka terminów, które bywają używane zamiennie, lecz mają precyzyjne znaczenia techniczne i prawne. Nieznajomość różnic może prowadzić do błędów formalnych przy rejestracji, ubezpieczeniu i planowaniu misji.

> **DEF**
> **BSP – Bezzałogowy Statek Powietrzny**
> Każdy statek powietrzny przeznaczony do lotu bez pilota na pokładzie, sterowany zdalnie lub autonomicznie. Termin stosowany w polskim prawie lotniczym (Ustawa Prawo Lotnicze, Dz.U. 2002 nr 130 poz. 1112 z późn. zm.) oraz w rozporządzeniach ULC. Po ludzku: to każdy dron – czy to mały quadcopter za 200 zł, czy duży samolot bezzałogowy patrolujący granicę.

> **DEF**
> **UAV – Unmanned Aerial Vehicle**
> Termin techniczny, wywodzący się z terminologii wojskowej i lotnictwa cywilnego. Oznacza sam pojazd powietrzny bez pilota, bez uwzględnienia systemu sterowania naziemnego. Po ludzku: sam "latający obiekt" – bez kontrolera, bez operatora, bez infrastruktury.

DEF

UAS – Unmanned Aircraft System

Pełny system bezzałogowy: UAV + stacja naziemna (GCS) + łącze łączności + operator + procedury. Termin preferowany przez ICAO (Doc 10019) i EASA. Po ludzku: cały ekwipunek i procedury razem – od pilota z kontrolerem, przez radio, aż po drona w powietrzu.

DEF

RPAS – Remotely Piloted Aircraft System

Podzbiór UAS, w którym pojazd jest stale pilotowany zdalnie przez człowieka w czasie rzeczywistym. Nie obejmuje systemów w pełni autonomicznych. Po ludzku: RPAS to UAS, w którym człowiek trzyma kciuki na drążkach. Autonomiczny dron lecący samodzielnie po zaplanowanej trasie to UAS, ale nie RPAS.

Tabela porównawcza terminologii

TERMIN	ZAKRES	ŹRÓDŁO	UWAGI
BSP	Sam statek powietrzny	Prawo PL Wojsko,	Termin prawny w Polsce
UAV	Sam pojazd powietrzny	technika	Zalecany w dokumentach Najstarszy termin
UAS	Pełny system System z pilotem	ICAO, EASA ICAO Doc	EU Wyklucza pełną
RPAS	zdalnym	10019	autonomię
Dron	Potoczny	Media, hobbyści	Brak definicji prawnej

W dokumentach EASA i przepisach EU używaj terminu UAS lub UA

⚠ UWAGA

(Unmanned Aircraft). W polskich dokumentach prawnych i formularzach ULC stosuj BSP . Termin „dron" jest potoczny i nie pojawia się w przepisach.

1.2 Klasyfikacja według EASA – kategorie operacyjne

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. oraz jego nowelizacje definiują trzy kategorie operacyjne UAS na terenie Unii Europejskiej. Polska, jako państwo UE, stosuje te przepisy bezpośrednio.

KATEGORIE OPERACYJNE UAS

OPEN (OTWARTA)	SPECIFIC (SZCZEGÓLNA)	CERTIFIED (CERTYFIK.)
Niskie ryzyko	Średnie ryzyko	Wysokie ryzyko

Brak zezwoleń	Zezwolenie/deklaracja	Certyfikacja
< 25 kg	Dowolna masa	Dowolna masa
VLOS	VLOS lub BVLOS	Transport ludzi

Kategorie operacyjne UAS (EASA)

Kategoria zależy od masy, miejsca lotu i typu operacji.

OPEN

niskie ryzyko,
< 25 kg, VLOS,
bez zezwoleń

SPECIFIC

średnie ryzyko,
zezwolenie lub
deklaracja,
VLOS lub BVLOS

CERTIFIED

wysokie ryzyko,
certyfikacja,
transport ludzi

Kategoria OPEN – szczegóły

Kategoria OPEN (otwarta) to operacje BSP uznane za niskiego ryzyka. Nie wymagają zezwolenia organu lotnictwa cywilnego (w Polsce: ULC – Urząd Lotnictwa Cywilnego), ale operator musi spełnić określone warunki. Trzy podkategorie:

Podkategoria	Maks. masa BSP	Warunki kluczowe	Certyfikat operatora
A1	< 250 g (lub klasa C1)	Lot nad ludźmi możliwy lub online (C1)	Nie wymagany (C0)
A2	< 4 kg (klasa C2)	Min. 30 m od ludzi (5 m w trybie low speed)	A2 (egzamin online + teoria)
A3	< 25 kg (klasy C3–C4)	Min. 150 m od zabudowań i zgromadzeń	A1/A3 (kurs online)

DEF

VLOS – Visual Line of Sight

Lot w zasięgu wzroku operatora. Operator musi być w stanie widzieć BSP bez pomocy urządzeń optycznych (z wyjątkiem okularów korekcyjnych) i oceniać jego orientację.

Kategoria SPECIFIC – szczegóły

Operacje o podwyższonym ryzyku wymagające oceny ryzyka metodą SORA (Specific Operations Risk Assessment) lub zastosowania standardowych scenariuszy STS. Wymagane zezwolenie ULC lub deklaracja zgodności ze scenariuszem. Przykłady operacji SPECIFIC:

- Lot BVLOS (poza zasięgiem wzroku)
- Loty nad obszarami zaludnionymi z masą > 4 kg
- Operacje inspekcyjne na infrastrukturze krytycznej

DEF

BVLOS – Beyond Visual Line of Sight

Lot poza zasięgiem wzroku operatora. Wymaga dodatkowych środków technicznych (telemetria, identyfikacja elektroniczna, nadzór przestrzeni).

Kategoria CERTIFIED – szczegóły

Najwyższy poziom regulacji. Dotyczy operacji analogicznych do lotnictwa załogowego: transport pasażerów, loty nad dużymi skupiskami ludzi. Wymaga certyfikacji operatora i samego statku powietrznego.

1.3 Klasy techniczne C0–C6 (EU 2019/945)

Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/945 definiuje klasy techniczne BSP wprowadzanych na rynek UE. Każda klasa C określa wymagania dla producenta (etykieta na produkcie) i powiązana jest z podkategorią operacyjną OPEN.

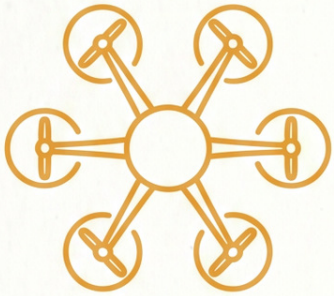
Klasa	Maks. masa (MTOM)	Powiązana podkategoria	Kluczowe wymagania techniczne
C0	< 250 g	A1	Brak, wymagania minimalne
C1	< 900 g	A1	Ograniczenie prędkości, e-identyfikacja (zalecana)
C2	< 4 kg	A2	Tryb niskiej prędkości, e-identyfikacja
C3	< 25 kg	A3	E-identyfikacja, geo-awareness
C4	< 25 kg	A3	Brak trybu autonomicznego
C5	Bez limitu	SPECIFIC (STS-01)	Rozszerzone wymagania
C6	Bez limitu	SPECIFIC (STS-02)	BVLOS, dodatkowe systemy

> ▶ **BŁĄD P**
>
> **Wielu początkujących sądzi, że masa drona to jedyne kryterium**

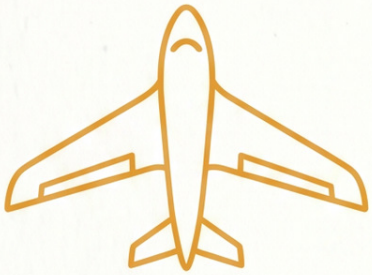
▶ decydujące o kategorii. Tak nie jest. Liczy się kombinacja: masa + miejsce lotu + typ operacji + klasa techniczna C. Dron 249 g lecący nad zgromadzeniem ludzi może wymagać kategorii SPECIFIC.

Typy platform BSP

Quadcopter — VTOL, hover, 10–30 min, FPV i fotografia



Hexacopter — redundancja, większy udźwig, inspekcja



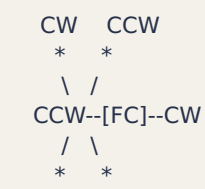
Fixed-Wing — długi lot 45–120 min, kartografia

VTOL Hybrid — pionowy start i efektywny przelot

1.4 Podział według geometrii – typy platform

Geometria platformy determinuje jej zachowanie aerodynamiczne, zastosowania i wymagania konfiguracyjne. Świadomy operator rozumie, dlaczego wybrał dany typ dla konkretnej misji.

Multirotor



Quadcopter – 4 wirniki w układzie X

Zasada działania: stała prędkość obrotowa silników zapewnia unoszenie; różnicowanie obrotów poszczególnych silników generuje pitch, roll i yaw.

Konfiguracja	Wirniki	Charakterystyka	Typowe zastosowanie
Tricopter	3	Lekki, ale sterowanie yaw przez serwomechanizm	Eksperymentalne
Quadcopter (X)	4	Najpopularniejszy, prosty, redundancja zerowa	FPV, fotografia, szkolenie
Hexacopter	6	Częściowa redundancja (lot na 5), większy udźwig	Profesjonalna fotografia, inspekcja
Octocopter	8	Wysoka redundancja, duży udźwig	Przemysł, ciężkie ładunki
X8 (koaxial)	8 (4 osie×2)	Kompaktowy, coaxial para silnik–silnik	Przemysł, ograniczona przestrzeń

Zalety multirotora: VTOL (pionowy start i lądowanie), hover w miejscu, mała prędkość minimalna, prostota pilotażu. Wady multirotora: mała sprawność energetyczna (duże zużycie energii na hover), krótki czas lotu, wrażliwość na wiatr.

Samolot bezzałogowy (Fixed-Wing)

Skrzydło nośne generuje siłę nośną w locie poziomym. Nie potrafi hovować – wymaga prędkości minimalnej (prędkości przeciągnięcia) do utrzymania lotu. Zalety: bardzo długi czas lotu, duży zasięg, wysoka sprawność energetyczna. Wady: wymaga pasa/katapulty do startu i lądowania (lub belly landing), brak możliwości hoveru, trudniejszy pilotaż. Zastosowania: kartografia, monitorowanie linii energetycznych, rolnictwo precyzyjne na dużych obszarach.

VTOL (Vertical Take-Off and Landing – Hybrid)

Łączy cechy multirotora (VTOL, hover) i samolotu (efektywny lot przekraczający). Posiada wirniki unoszące do startu/lądowania i silnik/śmigło napędowe do lotu przekraczającego. Zastosowania: długodystansowa inspekcja infrastruktury, logistyka, monitoring obszarowy.

Helikopter bezzałogowy

Jeden wirnik główny + wirnik ogonowy (lub coaxial). Stosowany rzadziej w cywilnym BSP ze względu na złożoność mechaniczną.

Tabela porównawcza typów platform

CECHA	QUADCOPTER	FIXED-WING	VTOL HYBRID	HEXACOPTER
VTOL	TAK	NIE	TAK	TAK
Hover	TAK	NIE	TAK (tryb multi)	TAK
Czas lotu	10–30 min	45–120 min	40–90 min	20–40 min
Zasięg typowy	2–10 km	50–200 km	20–100 km	3–15 km
Sprawność	Niska	Wysoka	Średnia	Niska
Złożoność	Niska	Średnia	Wysoka	Niska
budowy				
Odporność na	Niska–średni	Wysoka	Średnia	Średnia
wiatr	a			
Koszt wejścia	Niski	Średni	Wysoki	Średni

▶ BŁĄD Ś

Średniozaawansowani operatorzy często zakładają, że hexacopter jest

„lepszy" od quadcoptera w każdej sytuacji. Prawda: hexacopter jest cięższy, pobiera więcej prądu i nie leci dłużej przy tym samym zestawie baterii. Jego przewaga to redundancja silnikowa i większy udźwig – cechy ważne w zastosowaniach komercyjnych, nie w szkoleniu ani FPV.

1.5 Cywilne zastosowania BSP – przegląd

Zastosowanie	Typ platformy	Kategoria EASA	Kluczowe wymagania sprzętowe
	Quadcopter,		

Fotografia/wideo		OPEN A1/A2	Gimbal, kamera 4K
Inspekcja infrastruktury	Quadcopter, VTOL	OPEN A3 / SPECIFIC	Zoom optyczny, termowizja
Kartografia/fotogrametria	Fixed-Wing, VTOL	OPEN A3 / SPECIFIC	GPS RTK, nakładka naziemna
Rolnictwo precyzyjne	Fixed-Wing, VTOL, Octo	SPECIFIC	Multispektral, NDVI sensor
Monitoring obszarowy	Fixed-Wing, VTOL	SPECIFIC	Długi czas lotu, ADS-B
Dostawa towarów	Quadcopter, VTOL	SPECIFIC / CERTIFIED	Mechanizm zrzutu, redundancja
Wyszukiwanie i ratownictwo (SAR)	Quadcopter, Fixed-Wing	SPECIFIC	Termowizja, głośnik, reflektor
Szkolenie pilotażu	Quadcopter	OPEN A1/A3	Tryb Angle, ograniczniki

1.6 Podstawowe parametry charakteryzujące platformę

BSP

Każdy dron można scharakteryzować zestawem parametrów. Znajomość tych parametrów jest warunkiem koniecznym do świadomego doboru sprzętu, obliczania misji i oceny osiągów.

Parametry fizyczne

PARAMETR	SYMBOL	JEDNOSTKA	OPIS
Masa całkowita (MTOM)	m_fram	kg	Masa startowa z baterią i ładunkiem
Masa płatowca	e	kg	Bez baterii i ładunku Rozstaw osi silników (np. 250
Rozstaw silników	WB	mm	mm)
Wymiary gabarytowe	L×W×H	mm cale lub	Z/bez śmigieł
Średnica śmigła	D	mm	Np. 5 cali = 127 mm

Parametry wydajnościowe

Parametr	Symbol	Jednostka	Opis

```
Ciąg maksymalny  T_max  N lub g    Całkowity ciąg przy max. throttle
Stosunek ciągu do       bezwymiaro Musi być > 1 dla lotu; > 2 dla
masy                    wy         dynamiki
Czas lotu       t_flight minuty    Przy standardowym obciążeniu
Prędkość                m/s lub
maksymalna      V_max              Pozioma, przy bezwietrznej
                        km/h
Zasięg          R       km         Przy standardowych warunkach
Pułap operacyjny H_max  m AMSL     Maksymalna wys. nad poziomem
                        morza
```

Parametry elektryczne

PARAMETR	SYMBOL	JEDNOSTKA	OPIS
Napięcie nominalne	U_nom	V	Np. 14,8 V (4S LiPo)
baterii		mAh lub	
Pojemność baterii	C	Ah	Np. 1500 mAh Prąd przy unoszeniu się bez
Pobór prądu hoveru	I_hover	A	ruchu
Pobór prądu	I_max	A	Przy pełnym gazie
maksymalny			

★ **WNIOSEK**

Stosunek ciągu do masy (T/W) jest jednym z najważniejszych parametrów operacyjnych. Dla drona szkolnego T/W ≈ 2–3 zapewnia bezpieczną sterowność. Dla drona FPV T/W może wynosić 8–12 (wyczynowy). Dla drona inspekcyjnego z ładunkiem T/W ≈ 1,5–2 jest standardem.

1.7 Rejestracja i dokumentacja – podstawowe wymogi

w Polsce

Zgodnie z rozporządzeniem EU 2019/947 i przepisami ULC:

WYMÓG	DOTYCZY	ORGAN	UWAGI
Rejestracja	MTOM ≥ 250 g lub z	ULC /	Jednorazowa,
operatora UAS	kamerą	droneradar.eu	Test online ~40 bezpłatna

Szkolenie A1/A3	Operacje OPEN	UAVO (online) UAVO (online +	pytań Dodatkowy
Szkolenie A2	Operacje OPEN A2 MTOM ≥ 20 kg lub	teoria) Dowolny	egzamin Wymagane
Ubezpieczenie OC	SPECIFIC	ubezpieczyciel	prawnie
Planowanie w	Wszystkie operacje	PansaUTM /	Powiadomienie
UTM		Droneradar	strefy

Aktualne przepisy i strefy geograficzne dla Polski dostępne są w systemie PansaUTM prowadzonym przez Polską Agencję Żeglugi Powietrznej (PANSA).

1.8 Checklista rozdziału

- **Rozdział 1 – Checklista kompetencji**

- [ ] Znam różnicę między BSP, UAV, UAS i RPAS
- [ ] Potrafię wymienić 3 kategorie operacyjne EASA i ich

> kluczowe różnice

- [ ] Wiem, do jakiej podkategorii OPEN należy mój dron szkolny
- [ ] Znam klasy C0–C4 i wiem, czego dotyczą
- [ ] Rozróżniam quadcopter, fixed-wing i VTOL oraz ich

> zastosowania

- [ ] Potrafię podać minimum 5 parametrów charakteryzujących

> platformę BSP

- [ ] Wiem, gdzie w Polsce sprawdzić strefy lotu przed misją

1.9 Typowe błędy

▶ BŁĄD P

„Mój dron waży 249 g, więc mogę latać wszędzie bez żadnych

zasad." Nieprawda. Dron poniżej 250 g należy do klasy C0 i podkategorii A1, ale wciąż obowiązuje zakaz lotu w strefach D, R, P, CTR i nad zgromadzeniami ludzi bez stosownej podstawy prawnej. Masa ≤ 250 g tylko zwalnia z obowiązku rejestracji operatora.

▶ BŁĄD P

Mylenie masy drona z masą baterii.

▶ MTOM (Maximum Take-Off Mass) to masa całkowita z baterią, ładunkiem użytecznym i wszystkimi podzespołami. Dron „ważący 230 g" według producenta może po dodaniu baterii ważyć 340 g – co zmienia kategorię prawną.

▶ BŁĄD Ś

Zakup drona klasy C3 do operacji OPEN A1.

Klasy techniczne C są przypisane do podkategorii. Dron klasy C3 operuje w A3 (min. 150 m od zabudowań i zgromadzeń), nie w A1. Zakup nieodpowiedniej klasy oznacza ograniczenia operacyjne.

▶ PUŁAPKA D

Brak weryfikacji aktualnych stref przed lotem.

▶ Strefy przestrzeni powietrznej zmieniają się dynamicznie (NOTAM, strefy tymczasowe TRA, CTR). Sprawdzenie stref „raz na zawsze" na mapie nie wystarczy. Każda misja wymaga sprawdzenia w dniu lotu.

1.10 Pytania kontrolne

1. Jaka jest różnica między UAS a UAV? Podaj przykład obiektu będącego UAV,

ale nie będącego UAS.

2. Dron o masie 1,2 kg ma latać nad parkiem miejskim z pieszymi. Jaką

podkategorię OPEN może stosować? Jakie warunki musi spełnić?

3. Co oznacza skrót VLOS i dlaczego jest istotny z punktu widzenia

bezpieczeństwa?

4. Wymień trzy cechy różniące quadcopter od samolotu bezzałogowego

(fixed-wing) pod względem osiągów.

5. Dlaczego stosunek ciągu do masy (T/W) > 2 jest ważny dla drona szkolnego?

6. Gdzie w Polsce przed każdym lotem należy sprawdzić aktualną strukturę przestrzeni powietrznej?

7. Operator posiada dron klasy C2 o masie 2 kg. Chce latać 25 m od przechodniów w parku. Czy jest to legalne w kategorii OPEN? Uzasadnij.

8. Czym różni się kategoria SPECIFIC od OPEN? Podaj dwa przykłady operacji wymagających SPECIFIC.

1.11 Mini-test (5 pytań wielokrotnego wyboru)

Pytanie 1. Który termin opisuje CAŁY system: dron + stacja naziemna + łącze + operator?

- A) UAV
- B) RPAS
- C) UAS (poprawna)
- D) BSP

Pytanie 2. Dron o masie 400 g z kamerą. Który obowiązek prawny ciąży na operatorze w Polsce?

- A) Brak obowiązków – masa < 500 g
- B) Rejestracja operatora w ULC (poprawna)
- C) Certyfikacja drona w EASA
- D) Obowiązkowe ubezpieczenie OC Pytanie 3. W podkategorii OPEN A3 minimalna odległość od zabudowań i zgromadzeń wynosi:

- A) 30 m
- B) 50 m
- C) 100 m
- D) 150 m (poprawna)

Pytanie 4. Która platforma NIE potrafi hovować w miejscu bez ruchu postępowego?

- A) Hexacopter
- B) Quadcopter
- C) Samolot Fixed-Wing (poprawna)

- D) VTOL w trybie multirotorowym

Pytanie 5. Stosunek ciągu do masy (T/W) drona wynosi 0,9. Co to oznacza?

- A) Dron jest bardzo wydajny energetycznie
- B) Dron nie jest zdolny do pionowego wznoszenia (poprawna)
- C) Dron może lecieć z prędkością 90 km/h
- D) Dron wymaga certyfikacji EASA

(Odpowiedzi prawidłowe zaznaczono kursywą – w wersji drukowanej podręcznika odpowiedzi umieszczone są w oddzielnym arkuszu.)

1.12 Najważniejsze wnioski operacyjne

> ★ **WNIOSEK 1**
> Znajomość terminologii (BSP/UAS/UAV/RPAS) to nie akademia – to warunek poprawnego wypełnienia dokumentów i unikania błędów prawnych. Używaj właściwego terminu w właściwym kontekście.

> ★ **WNIOSEK 2**
> Kategoria operacyjna (OPEN/SPECIFIC/CERTIFIED) zależy od kombinacji: masa drona + lokalizacja lotu + typ operacji. Sama masa nie wystarczy do klasyfikacji.

> ★ **WNIOSEK 3**
> Klasa techniczna C (C0–C6) to cecha sprzętu nadawana przez producenta. Kategoria operacyjna to twoja decyzja i odpowiedzialność jako operatora.

> ★ **WNIOSEK 4**
> Przed każdą misją: sprawdź aktualną strukturę przestrzeni powietrznej w PansaUTM lub Droneradar. Strefy zmieniają się codziennie. ★

> ★ **WNIOSEK 5**
> T/W > 2 to minimalne kryterium wyboru drona szkolnego. Poniżej tej wartości platforma jest trudna do kontroli i niebezpieczna w warunkach wietrznych. Źródła do rozdziału 1:

- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/947 z dnia 24

maja 2019 r.,

- EUR-Lex
- Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/945 z dnia 12 marca 2019 r.,
- EUR-Lex
- ICAO Doc 10019 – Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS),

wydanie pierwsze,

- ICAO
- Urząd Lotnictwa Cywilnego – Informacje dla operatorów BSP,
- ULC
- PansaUTM – System zarządzania przestrzenią dla BSP,
- utm.pansa.pl

ROZDZIAŁ 2

Historia i ewolucja dronów

Część: I – Fundamenty
Czas nauki szacowany: 45 minut

2.0 Cele szkoleniowe

Po ukończeniu tego rozdziału kursant:

1. Wymienia kluczowe kamienie milowe w historii bezzałogowych statków powietrznych od 1916 do dziś.
2. Wskazuje, które technologie wojskowe przeszły do zastosowań cywilnych i dlaczego.
3. Identyfikuje czynniki, które spowodowały gwałtowny wzrost rynku dronów konsumenckich po 2010 roku.
4. Interpretuje trendy rozwojowe (2025–2030) i ich wpływ na wymagania stawiane operatorom.
5. Wyciąga wnioski historyczne istotne dla konstruktora i operatora BSP.

2.1 Początki: torpedy latające i pierwsze RPV

(1916–1960)

Historia dronów nie zaczęła się od DJI ani od Predatora. Zaczęła się od problemów, które inżynierowie próbowali rozwiązać sto lat temu: jak uderzyć w cel bez ryzyka utraty pilota.

1916–1918: Kettering Bug i Hewitt-Sperry Automatic

Airplane

Pierwszym bezzałogowym statkiem powietrznym zaprojektowanym bojowo był Hewitt-Sperry Automatic Airplane (1916), a następnie Kettering Bug (1918) – skrzydlata torpeda napędzana silnikiem tłokowym, sterowana żyroskopowym autopilotem. Bug latał z prędkością ~190 km/h na odległość do 120 km. Nigdy nie trafił na front I wojny światowej, ale udowodnił, że autonomiczny lot jest możliwy.

```
KETTERING BUG (1918) – parametry:
  Masa startowa:    ~240 kg
  Rozpiętość:       4,6 m
  Silnik:           4-cylindrowy, 35 KM
  Zasięg:           ~120 km
  Autopilot:        żyroskop + barometr
  Status:           prototyp bojowy, nieużyty bojowo
```

Lekcja dla konstruktora: Żyroskop + barometr = podstawowy autopilot. Ta sama koncepcja sensoryczna żyje dziś w każdym kontrolerze lotu z IMU.

1935–1944: Queen Bee i cele powietrzne

W 1935 roku brytyjska marynarka wojenna opracowała de Havilland DH.82B Queen Bee – bezzałogową wersję samolotu Tiger Moth, przeznaczoną jako latający cel do ćwiczeń dla artylerii przeciwlotniczej. To właśnie od nazwy „Queen Bee" (angielskie: bee = pszczoła) pochodzi słowo „drone" (ang. truteń, samiec pszczoły) – co potwierdzają źródła historyczne, m.in. Smithsonian National Air and Space Museum . Queen Bee była sterowana radiem z ziemi – pierwszy masowy system RPAS.

Lata 50. i 60.: Zimna Wojna i rozpoznanie

Zestrzelenie U-2 (pilotowanego samolotu szpiegowskiego) nad ZSRR w 1960 roku przyspieszyło prace nad bezzałogowymi platformami rozpoznawczymi. USA rozwinęły program Ryan Firebee – odrzutowy dron rozpoznawczy, latający nad Wietnamem i Chinami. Zebrał tysiące godzin materiału wywiadowczego bez ryzyka utraty pilota.

2.2 Era wojskowa: Pioneer, Predator, Global Hawk

(1980–2000)

Lata 80.: Pioneer i izraelska rewolucja

Izrael jako pierwszy kraj masowo zastosował drony do rozpoznania taktycznego podczas wojny libańskiej (1982). System IAI Scout i IAI Mastiff dały siłom zbrojnym IDF w czasie rzeczywistym obraz pola walki – coś, co wcześniej wymagało samolotów pilotowanych narażonych na zestrzelenie. IAI Pioneer – wspólny produkt USA i Izraela,

wszedł do służby w US Navy w 1986 roku. Operator siedział w naziemnej stacji kontroli i widział obraz z kamery na żywo. Pioneer latał podczas Operacji Pustynna Burza (1991), zbierając dane rozpoznawcze i korygując ogień artyleryjski.

```
IAI PIONEER – parametry operacyjne:
  MTOM:          ~205 kg
  Rozpiętość:     5,2 m
  Silnik:         tłokowy, 26 KM
  Czas lotu:      ~5 h
  Prędkość:       ~185 km/h
  Link danych:    analogowy, VLOS/krótkie BVLOS
  Nowość:         kamera TV na żywo + łącze danych
```

Lata 90.: Predator i era MALE

General Atomics MQ-1 Predator (1994) to platforma, która zdefiniowała pojęcie MALE (Medium Altitude Long Endurance). Po raz pierwszy w historii dron mógł latać dziesiątki godzin nad obszarem konfliktu, transmitując obraz satelitarnie do operatorów siedzących w bazie na drugim kontynencie. Predator był pierwotnie bezzałogowym samolotem rozpoznawczym. Dopiero późniejsze wersje zostały dozbrojone – lecz to nie jest tematem niniejszego podręcznika. Global Hawk (Northrop Grumman, 1998) – HALE (High Altitude Long Endurance), latający na wysokości ~18 000 m przez ponad 30 godzin. Zasięg: ponad 22 000 km. To urządzenie, pod względem złożoności systemu, jest bliższe samolotowi pasażerskiemu niż dronowi FPV.

Czego uczy historia wojskowych BSP?

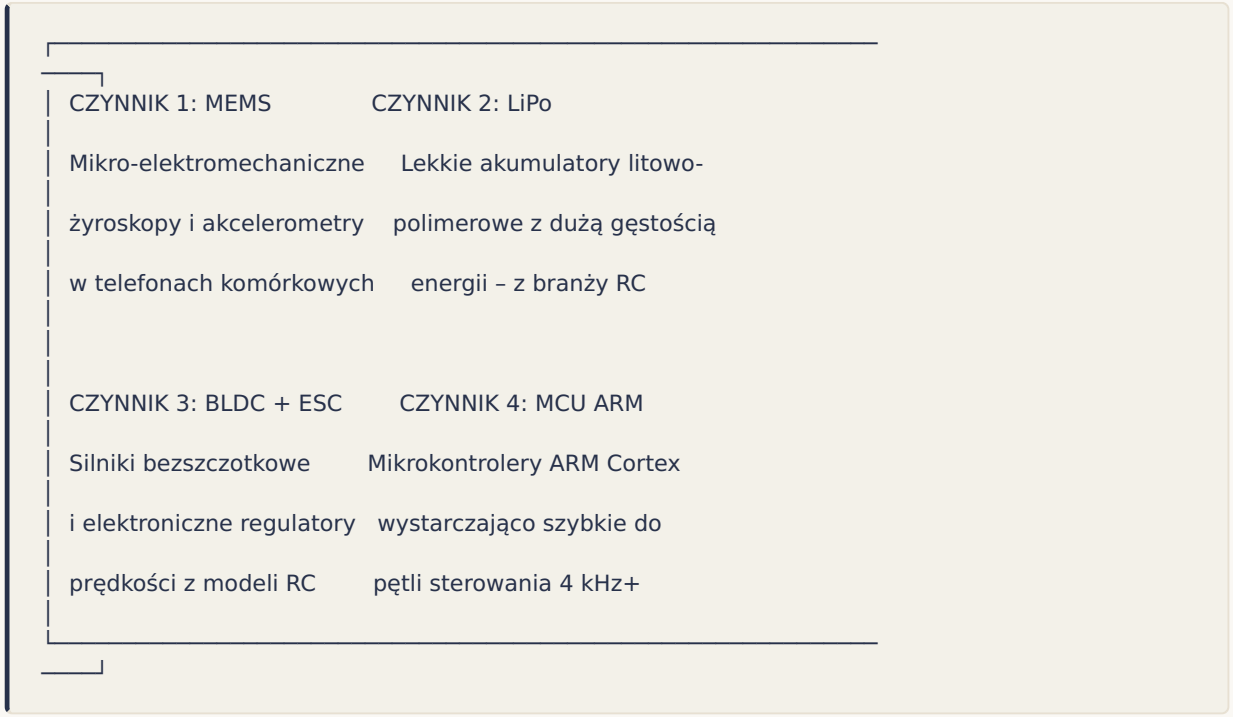
LEKCJA	ZASTOSOWANIE CYWILNE
Żyroskop + barometr = autopilot	Każdy FC ma dziś IMU+baro
Łącze danych + kamera = świadomość sytuacyjna	FPV goggles + OSD
Redundancja systemów krytycznych	Dual-receiver, dual-ESC
Planowanie misji przed startem	Briefing, waypoints
Analiza danych po locie	Blackbox, logi telemetrii
Niezawodność > osiągi	Safety-first w cywilnym BSP

2.3 Demokratyzacja technologii: DJI, 3DR, FPV

(2010–2020)

Cztery czynniki rewolucji konsumenckiej

Gwałtowny wzrost rynku dronów konsumenckich po 2010 roku był możliwy dzięki zbiegnięciu się czterech trendów technologicznych:



2006–2012: narodziny open-source FC

ArduPilot (2007) – pierwszy otwartoźródłowy kontroler lotu, oparty na platformie Arduino. Umożliwił hobbystom budowę autonomicznych quadcopterów bez dostępu do oprogramowania wojskowego. MultiWii (2010) – kontroler lotu oparty na żyroskopach z kontrolera Nintendo Wii. Dowód, że masowe czujniki MEMS z elektroniki użytkowej nadają się do sterowania lotem. OpenPilot / LibrePilot – kolejne projekty open-source, które ugruntowały koncepcję otwartego oprogramowania dla BSP.

2013: DJI Phantom 1 – punkt przełomowy

DJI (Da-Jiang Innovations, Shenzhen, Chiny) wypuściło w 2013 roku Phantom 1 – gotowy do lotu quadcopter z GPS, stabilizacją i uchwytem na kamerę GoPro. Cena: ~679 USD. Wcześniej porównywalny system kosztował kilka tysięcy dolarów i wymagał samodzielnego montażu. Phantom 1 zdefiniował kategorię RTF (Ready-to-Fly) i otworzył rynek dronów dla fotografów, filmowców i hobbystów bez wiedzy elektronicznej.

```
EWOLUCJA DJI:
  2013: Phantom 1       → GPS hover, RTF, kamera GoPro
```

```
2015: Phantom 3       → wbudowana kamera 4K, transmisja HD
2016: Mavic Pro       → składany, kieszonkowy, 4K, 7 km zasięgu
2020: DJI FPV         → gogle, tryb manual, prędkość 140 km/h
2022: DJI Avata       → cinewhoop, gogle 2, tryb motion control
2024: DJI Neo         → autonomia, follow-me, masa < 249 g
```

FPV jako nurt równoległy

Równolegle do segmentu kamer rozwijał się nurt FPV (First Person View) – drony wyścigowe i freestyle lecące z perspektywy pilota przez gogle wideo. Społeczność FPV rozwinęła własny ekosystem: ramy karbonowe, otwarte oprogramowanie (Betaflight, KISS), protokoły łączności (ELRS, Crossfire), gotowe zestawy. FPV dostarczyło branży:

- miniaturyzację ESC i FC (stack 20×20 mm)
- protokoły cyfrowe DShot
- otwarte platformy konfiguracyjne (Betaflight Configurator)
- kulturę dokumentowania i analizy logów (blackbox)

> ▶ BŁĄD P
>
> **Wielu początkujących traktuje FPV i fotodron jako zupełnie osobne**
>
> światy. W rzeczywistości dzielą tę samą fizykę, te same protokoły (ESC, RC, OSD) i te same procedury bezpieczeństwa. Wiedza z jednego obszaru bezpośrednio wzbogaca drugi.

2.4 Aktualny stan rynku i prognozy 2025–2030

Rynek globalny (dane 2024–2025)

Według raportu Drone Industry Insights wartość globalnego rynku BSP w 2024 roku przekroczyła 30 miliardów USD. Najszybciej rosnące segmenty:

SEGMENT	WZROST ROCZNY (CAGR)	KLUCZOWE TECHNOLOGIE
Inspekcja infrastruktury	~15%	Termowizja, AI, BVLOS
Rolnictwo precyzyjne	~20%	Multispektral, opryski BSP
Logistyka i dostawa	~35%	VTOL, UTM, certyfikacja
Bezpieczeństwo	~18%	Termowizja, głośniki, AI
publiczne		Symulatory, certyfikacja
Edukacja i szkolenia	~25%	EASA

Trendy technologiczne 2025–2030

1. Powszechna integracja AI

Systemy detekcji obiektów, śledzenia ruchu i autonomicznego unikania przeszkód stają się standardem w segmencie komercyjnym. Operator przechodzi od pilota do menadżera misji.

2. UTM (UAS Traffic Management)

Systemy zarządzania ruchem BSP analogiczne do ATM (Air Traffic Management) dla lotnictwa załogowego. W UE implementowane przez U-Space (rozporządzenie EU 2021/664). W Polsce: PansaUTM.

3. BVLOS jako norma operacyjna

Operacje poza zasięgiem wzroku przestają być wyjątkiem, stają się standardem w inspekcji, logistyce i monitoringu. Wymaga od operatorów głębszej wiedzy z telemetrii, systemów awaryjnych i planowania przestrzeni powietrznej.

4. eVTOL i lotnicze taksówki

Pojazdy elektryczne pionowego startu i lądowania zdolne do transportu pasażerów (Joby Aviation, Lilium, Wisk) zbliżają się do certyfikacji. Granica między BSP a lotnictwem załogowym zaciera się.

5. Standaryzacja i certyfikacja operatorów

EASA konsekwentnie podnosi wymagania kompetencyjne. Operatorzy bez formalnych szkoleń i dokumentacji będą wykluczani z operacji komercyjnych.

> ▶ **PUŁAPKA D**
>
> **Trend „wszystko robi AI" prowadzi niektórych operatorów do**
>
> przekonania, że umiejętności manualne i wiedza techniczna są zbędne. To błąd. Im bardziej autonomiczny system, tym poważniejsze konsekwencje jego awarii – i tym większa odpowiedzialność operatora za diagnostykę, interwencję i decyzje GO/NO-GO.

2.5 Lekcje z historii dla konstruktora i operatora

Historia BSP to nie jest sucha kronika dat. To zbiór powtarzających się wzorców, z których można wyciągać praktyczne wnioski:

WZORZEC HISTORYCZNY	WNIOSEK DLA CYWILNEGO BSP
Żyroskop + barometr	Rozumiej swój IMU – to samo urządzenie, tyle że
(1918)	mniejsze

Redundancja systemów	Dual-receiver, dual-IMU, failsafe to nie luksus
wojskowych	
Analiza danych po misji	Blackbox i logi po każdym locie
(Predator)	
Standaryzacja procedur	Checklista to rutyna, nie biurokracja Każdy incydent branżowy generuje nowe przepisy –
Katastrofy jako źródło norm	znaj ich historię
Otwarte oprogramowanie	Społeczność open-source napędza innowacje –
(ArduPilot)	bierz w niej udział

2.6 Checklista rozdziału

Rozdział 2 – Checklista kompetencji

- [ ] Potrafię wymienić co najmniej 3 kluczowe etapy historii

> BSP

- [ ] Wiem, dlaczego termin "drone" pochodzi od Queen Bee
- [ ] Rozumiem, jakie 4 technologie umożliwiły boom dronów po

> 2010

- [ ] Znam co najmniej 2 projekty open-source FC i ich znaczenie
- [ ] Rozumiem, dlaczego trendy rynkowe zwiększają wymagania

> wobec operatorów

- [ ] Potrafię wskazać 3 lekcje historyczne istotne dla mojej

> praktyki

2.7 Typowe błędy

> ▶ **BŁĄD P**
>
> **Traktowanie historii BSP jako tematu nieistotnego.**

▶ Operator, który rozumie, skąd pochodzi dana technologia, lepiej rozumie jej ograniczenia. Żyroskop MEMS dryfuje z temperaturą – bo tak samo dryfowały żyroskopy mechaniczne w 1918 roku. Zasada jest ta sama.

> ▶ BŁĄD Ś
>
> **Ignorowanie trendów regulacyjnych.**
>
> Operatorzy koncentrują się na sprzęcie, ignorując zmiany w prawie. Historia pokazuje, że każdy poważny incydent z dronem generował nowe przepisy w ciągu 12–24 miesięcy. Śledzenie regulacji EASA i ULC to obowiązek zawodowego operatora.

2.8 Pytania kontrolne

1. Jakie dwa czujniki stanowiły autopilot w Kettering Bug (1918) i jak mają się one do współczesnego kontrolera lotu?

2. Dlaczego zestrzelenie U-2 w 1960 roku przyspieszyło rozwój bezzałogowych platform rozpoznawczych?

3. Wymień cztery czynniki technologiczne, które umożliwiły boom dronów konsumenckich po 2010 roku.

4. Co odróżniało DJI Phantom 1 (2013) od wcześniej dostępnych quadcopterów na rynku hobbystycznym?

5. Jaki związek ma kultura społeczności FPV (blackbox, otwarte firmware) z profesjonalnym użytkowaniem dronów komercyjnych?

6. Jakie zagrożenie dla kompetencji operatora niesie coraz większa automatyzacja i integracja AI w dronach?

2.9 Mini-test

Pytanie 1. Od jakiego pojazdu pochodzi słowo „drone"?

- A) Od samolotu Predator
- B) Od brytyjskiego drona Queen Bee (poprawna)
- C) Od torpedy Kettering Bug
- D) Od projektu ArduPilot

Pytanie 2. Która technologia z branży telefonów komórkowych umożliwiła miniaturyzację autopilotów?

- A) Akumulatory Li-Ion
- B) Moduły GPS
- C) Mikro-elektromechaniczne sensory MEMS (poprawna)
- D) Protokoły Bluetooth

Pytanie 3. Który projekt jako pierwszy udostępnił otwartoźródłowy kontroler lotu dla hobbystów?

- A) DJI Naza
- B) MultiWii
- C) ArduPilot (poprawna)
- D) Betaflight

Pytanie 4. Trend BVLOS jako norma operacyjna oznacza dla operatora BSP:

- A) Mniejsze wymagania kompetencyjne, bo dron leci autonomicznie
- B) Większe wymagania z zakresu telemetrii, planowania i systemów

awaryjnych (poprawna)

- C) Brak konieczności rejestracji operatora
- D) Możliwość latania bez certyfikatu w kategorii OPEN

Pytanie 5. Czego NIE uczy historia wojskowych BSP w kontekście cywilnym?

- A) Wartości redundancji systemów
- B) Konieczności analizy danych po locie
- C) Technik uzbrajania i atakowania celów (poprawna)
- D) Standaryzacji procedur operacyjnych

2.10 Najważniejsze wnioski operacyjne

> ★ **WNIOSEK 1**
> Współczesny kontroler lotu FC zawiera te same elementy sensoryczne (żyroskop, barometr) co autopiloty z 1918 roku – tyle że 1000 razy mniejsze i 100 razy tańsze. Rozumienie ich ograniczeń (dryft, szum) jest niezmienne w czasie. ★

> ★ **WNIOSEK 2**
> Cztery technologie umożliwiły boom: MEMS, LiPo, BLDC/ESC, MCU ARM. Każda z nich ma swoje fizyczne ograniczenia – znajomość historii pomaga rozumieć, dlaczego te ograniczenia istnieją. ★

★ WNIOSEK 3

Open-source (ArduPilot, Betaflight) to fundament wiedzy dronowej. Korzystaj z dokumentacji tych projektów – są pisane przez inżynierów dla inżynierów i zawierają głębszą wiedzę niż większość kursów.

★ WNIOSEK 4

Rosnąca automatyzacja i AI NIE zmniejszają roli kompetentnego operatora. Zwiększają odpowiedzialność za diagnostykę, interwencję i decyzje w sytuacjach, których algorytm nie przewidział. ★

★ WNIOSEK 5

Historia regulacji BSP pokazuje wzorzec: incydent → przepis. Operator, który rozumie genezę reguł, przestrzega ich z przekonania, a nie z przymusu. To fundament kultury bezpieczeństwa. Źródła do rozdziału 2:

- Smithsonian National Air and Space Museum – historia terminu "drone",
- airandspace.si.edu
- Taylor, J.W.R. – Jane's All The World's Aircraft (edycje historyczne)
- Drone Industry Insights – Global Drone Market Report 2024,
- droneii.com
- ArduPilot Project – historia projektu open-source,
- ardupilot.org
- Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2021/664 w sprawie ram

regulacyjnych U-Space,

- EUR-Lex
- Newcome, L.R. – Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aerial

Vehicles, AIAA 2004

ROZDZIAŁ 3

Podstawy fizyki lotu

Część: I – Fundamenty
Czas nauki szacowany: 120 minut

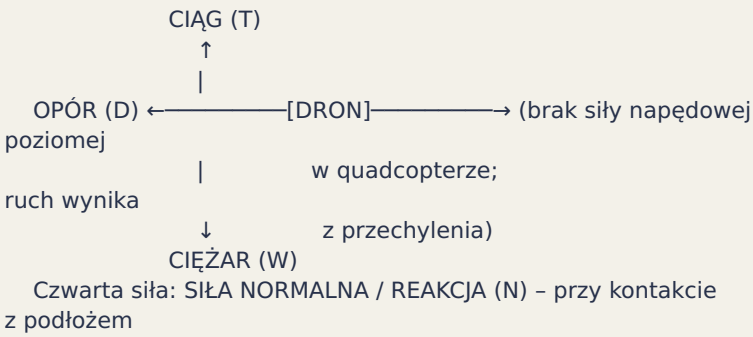
3.0 Cele szkoleniowe

Po ukończeniu tego rozdziału kursant:

1. Opisuje cztery siły działające na dron w locie i wskazuje ich wektory kierunkowe.
2. Wyjaśnia, w jaki sposób wirnik generuje ciąg zgodnie z III zasadą dynamiki Newtona.
3. Rozróżnia wyjaśnienie Bernoulliego od wyjaśnienia Newtona w kontekście siły nośnej śmigła.
4. Opisuje moment żyroskopowy i efekt precesji oraz ich praktyczne skutki dla multirotora.
5. Definiuje sprawność aerodynamiczną śmigła (Figure of Merit) i interpretuje jej wartości.
6. Przeprowadza podstawowe obliczenia związane z ciągiem i mocą wirnika.

3.1 Cztery siły w locie wirnikowym

Każdy dron w locie jest poddany działaniu czterech podstawowych sił. Ich wzajemny stosunek determinuje, czy dron wznosi się, opada, porusza poziomo czy zawisa w miejscu.



Definicje i wektory

DEF

Ciąg (Thrust, T)

Siła generowana przez obracające się śmigła, skierowana prostopadle do płaszczyzny obrotu wirnika (w górę przy locie poziomym). Jednostka: Niuton [N] lub gram-siła [gf]. Po ludzku: to siła, która „pcha" drona w górę. Im szybciej kręcą się śmigła, tym większy ciąg.

DEF

Ciężar (Weight, W)

Siła grawitacji działająca na masę drona, skierowana pionowo w dół. W = m · g, gdzie g = 9,81 m/s². Po ludzku: to siła, która „ciągnie" drona w dół. Zależy wyłącznie od masy – nie od prędkości ani wysokości (w granicach operacyjnych BSP).

DEF

Opór aerodynamiczny (Drag, D)

Siła działająca przeciwnie do kierunku ruchu drona. Powstaje w wyniku tarcia powietrza o powierzchnie platformy. Po ludzku: to „opór powietrza". Im szybciej leci dron, tym większy opór.

DEF

Siła boczna / składowa pozioma ciągu

W multirotorze ruch poziomy jest wynikiem przechylenia (pitch/roll) platformy – część wektora ciągu staje się wtedy siłą poziomą. Nie istnieje oddzielny silnik poziomy.

```
HOVER (zawieszenie):          PRZÓD (pitch forward):
   T = W                          T
   T ↑   W ↓                       ↗  (przechylony)
   Równowaga                      /
                              Dron
                              →   (ruch poziomy = składowa
pozioma T)
```

Warunki stanów lotu

STAN LOTU	WARUNEK	OPIS
Hover	T = W	Ciąg równa się ciężarowi; brak ruchu
(zawis)		pionowego
Wznoszenie	T > W	Ciąg większy od ciężaru; dron unosi się
Opadanie	T < W	Ciąg mniejszy od ciężaru; dron opada Ciąg równoważy ciężar + składowa pcha do
Lot poziomy	T = W, pochylenie	przodu
Przyspiesza	Pochylenie	Większa składowa pozioma; T > W chwilowo
nie	wzrasta	

▶ Początkujący myślą, że „więcej gazu = szybciej do przodu". W multirotorze

▶ **BŁĄD P**

więcej gazu oznacza więcej ciągu pionowego. Prędkość pozioma to efekt pochylenia platformy, nie samego gazu.

3.2 Zasada akcji i reakcji – skąd bierze się ciąg wirnika

III zasada dynamiki Newtona

Każda akcja wywołuje reakcję równą co do wartości i przeciwną co do kierunku. Wirnik drona akceleruje masę powietrza w dół (akcja). Powietrze reaguje siłą skierowaną w górę (reakcja) – i to jest ciąg.

Wzór na ciąg z zasady pędu:
$T = \dot{m} \cdot \Delta v$
gdzie:
T – ciąg [N]
$\dot{m}$ – masowy strumień powietrza [kg/s] (ile kg powietrza na sekundę)
Δv – przyrost prędkości powietrza [m/s] (jak mocno śmigło przyspiesza powietrze)

Przykład obliczeniowy 3.1: Śmigło 5" (127 mm) przy 8000 RPM przyspiesza strumień powietrza o $\Delta v = 12$ m/s. Masa przepływającego powietrza: $\dot{m} = 0{,}025$ kg/s.

$T = \dot{m} \cdot \Delta v = 0{,}025 \cdot 12 = 0{,}30$ N $= 30{,}6$ gf

Rzeczywiste wartości ciągu dla śmigieł 5" przy typowych obrotach wynoszą 400–900 gf w zależności od geometrii i KV silnika – powyższe to uproszczone szacowanie; precyzyjne wartości pochodzą z testów na stanowisku pomiarowym (thrust stand).

Dysk aktuacyjny (actuator disk theory)

Klasyczna teoria dysku aktuacyjnego (Rankine-Froude) opisuje wirnik jako nieskończenie cienki dysk, który nadaje prędkość strumieniu powietrza.

Wzór na ciąg z teorii dysku aktuacyjnego:
$T = 2 \cdot \rho \cdot A \cdot v_i^2$
gdzie:
ρ – gęstość powietrza [kg/m³] (standardowo 1,225 kg/m³ na poziomie morza)
A – pole powierzchni dysku [m²] ($= \pi \cdot r^2$, gdzie r = promień śmigła)
v_i – prędkość wywołana (induced velocity) [m/s]

Po ludzku: im większe śmigło (większe A) i im większa gęstość powietrza (ρ), tym więcej ciągu przy tej samej energii. Dlatego duże, wolno obracające się śmigła są bardziej wydajne energetycznie niż małe, szybkie.

3.3 Bernoulli vs. Newton – dwa modele wyjaśniające

siłę nośną

W literaturze popularnej często pojawia się pytanie: „Czy siłę nośną tworzy Bernoulli czy Newton?" Odpowiedź: oba modele są poprawne i komplementarne – opisują ten sam zjawisko z różnych perspektyw.

Model Bernoulliego

Zasada Bernoulliego: w przepływie nieściśliwym suma ciśnienia statycznego i dynamicznego jest stała wzdłuż linii prądu.

```
  p + ½ · ρ · v² = const
gdzie:
  p  – ciśnienie statyczne [Pa]
  ρ  – gęstość cieczy/gazu [kg/m³]
  v  – prędkość przepływu [m/s]
```

Profil śmigła jest zbudowany tak, że powietrze przepływające po górnej (wypukłej) powierzchni łopaty ma większą prędkość niż po dolnej – co generuje niższe ciśnienie na górze i wyższą siłę nośną. Ograniczenie modelu Bernoulliego: zakłada idealny przepływ bez lepkości. W praktyce, szczególnie przy dużych kątach natarcia i turbulencji, model Bernoulliego nie wyjaśnia w pełni zachowania śmigła.

Model Newtonowski

Łopata śmigła odchyla strumień powietrza w dół. Zgodnie z III zasadą Newtona, powietrze odpycha łopatę w górę. Siła nośna = reakcja na odchylenie strumienia.

```
  Siła nośna = zmiana pędu strumienia powietrza na jednostkę
czasu
```

⊥

```
L = ṁ · Δv_⊥
```

Wniosek dla operatora: oba modele łącznie dają pełny obraz. W praktyce operacyjnej ważniejszy jest wniosek praktyczny: kąt natarcia łopaty i jej geometria bezpośrednio wpływają na ciąg . Właśnie dlatego pitch śmigła (w calach skoku) jest parametrem konfiguracyjnym.

★ WNIOSEK

Śmigło o wyższym pitch (skoku) przy tych samych obrotach generuje ★ większy ciąg (do pewnego limitu) i większy pobór prądu. Nie ma nic za darmo – wyższy ciąg to wyższy pobór energii.

3.4 Moment żyroskopowy i efekt precesji

Moment żyroskopowy

Każde obracające się śmigło jest żyroskopem. Żyroskop opiera się zmianie kierunku swojej osi obrotu. W praktyce oznacza to, że próba zmiany orientacji drona (yaw, pitch, roll) generuje siły reakcji związane z momentem żyroskopowym silników.

DEF

Precesja żyroskopowa

Gdy na żyroskop działamy momentem siły w jednej płaszczyźnie, reakcja pojawia się w płaszczyźnie prostopadłej, przesunięta o 90° w kierunku obrotu.

```
EFEKT PRECESJI W QUADCOPTERZE:
  Silniki 1,3 (CW) + Silniki 2,4 (CCW) → momenty żyroskopowe
się znoszą
  Przy yaw w prawo:
    CW silniki zwalniają, CCW przyspieszają
    → Zmiana momentów żyroskopowych
    → Nieznaczny efekt pitch/roll (w praktyce kompensowany
przez FC)
```

Dlaczego w quadcopterze silniki ustawia się parami

CW/CCW?

W quadcopterze dwa silniki obracają się zgodnie z ruchem wskazówek zegara (CW), a dwa – przeciwnie (CCW). Układ parami symetryczny zapewnia:

1. Zniesienie momentów żyroskopowych – sumaryczny moment kątowy

układu wirników ≈ 0.

2. Sterowanie yaw – zmiana prędkości par CW vs. CCW generuje obrót

platformy wokół osi pionowej.

```
Kierunki obrotu w quadcopterze (widok z góry):
      CCW (2)      CW (1)
        *            *
         \          /
          [  FC  ]
         /          \
        *            *
```

```
      CW (3)       CCW (4)
Para 1+4 (CW): obrót yaw w lewo gdy przyspiesza
Para 2+3 (CCW): obrót yaw w prawo gdy przyspiesza
```

▶ BŁĄD P

Zamiana miejscami śmigieł CW i CCW powoduje, że sterowanie yaw

działa odwrotnie lub dron jest niestabilny i niemożliwy do kontroli. Zawsze weryfikuj kierunek obrotu silników i typ śmigła (oznaczenia: CW / CCW lub „R" na śmigle reversowym).

3.5 Sprawność aerodynamiczna śmigła – Figure of

Merit (FM)

DEF

Figure of Merit (FM)

Bezwymiarowy wskaźnik sprawności wirnika w hoverie. Definiowany jako stosunek mocy idealnej (minimalnej teoretycznie możliwej) do mocy rzeczywistej pobieranej przez wirnik.

```
  FM = P_ideal / P_actual = T^(3/2) / (√(2·ρ·A) · P_actual)
gdzie:
  T      – ciąg [N]
  ρ      – gęstość powietrza [kg/m³]
  A      – powierzchnia dysku śmigła [m²]
  P_actual – rzeczywista moc elektryczna pobierana przez
układ [W]
```

Interpretacja wartości FM

WARTOŚĆ FM	OCENA	TYPOWY ZASTOSOWANIE
0,75–0,80	Doskonały	Profesjonalne śmigła optymalizowane
0,65–0,74	Dobry	Wysokiej jakości śmigła konsumenckie
0,50–0,64	Przeciętny	Typowe plastikowe śmigła RC
< 0,50	Słaby	Uszkodzone, niewyważone, nieodpowiednie

Przykład obliczeniowy 3.2: Quadcopter hover przy: T = 8 N (ciąg jednego silnika 2 N × 4), ρ = 1,225 kg/m³, średnica śmigła 5" = 0,127 m.

```
  A = π · r² = π · (0,0635)² = 0,01267 m²
  P_ideal = T^(3/2) / √(2 · ρ · A)
        = 8^(3/2) / √(2 · 1,225 · 0,01267 · 4)  [dla 4
śmigieł: A_total = 4×A]
  Pomijając rozpisanie pełne: dla FM = 0,65 i P_actual = 80
W
```

```
    P_ideal = FM · P_actual = 0,65 · 80 = 52 W
    Wniosek: 28 W (35%) jest tracone na straty (wirowanie
powietrza,
    opory profilowe, straty na krawędziach łopat).
```

Po ludzku: FM mówi, jak dobrze śmigło zamienia energię elektryczną na ciąg. Jeżeli dron hover pobiera 100 W, a FM = 0,65, to 65 W „pracuje" na ciąg, 35 W jest marnowane na ciepło i turbulencje.

★ WNIOSEK

Większe śmigło = wyższe FM = dłuższy czas lotu przy tej samej baterii. ★ To dlatego drony inspekcyjne (np. 7" lub 10") latają znacznie dłużej niż drony wyścigowe 5" przy podobnej masie systemu.

3.6 Efekt ziemi (Ground Effect)

DEF

Efekt ziemi (Ground Effect, GE)

Wzrost sprawności wirnika (i ciągu) przy locie w pobliżu ziemi (zwykle H < 1× średnica śmigła). Wynika z ograniczenia strat wirtualnych na końcach łopat – ziemia „odbija" strumień.

```
Efekt ziemi:
    H < 0,5 D:   wzrost ciągu ~10–20% przy tej samej mocy
    H > 1,0 D:   efekt zanika, praca wirnika jak w swobodnej
przestrzeni
gdzie D = średnica śmigła
```

Praktyczne skutki:

- Dron startujący z ziemi łatwiej się unosi przy niskim gazie – może zmylić operatora co do rzeczywistego marginesu ciągu.
- Przy wznoszeniu powyżej strefy efektu ziemi (ok. 0,5–1,5 m) dron może chwilowo „osiąść" jeśli throttle był za niski.
- Lądowanie w efekcie ziemi wymaga ostrożniejszego zmniejszania throttle – ciąg rośnie nagle przy zejściu nisko.

▶ BŁĄD P

Początkujący latają tuż nad ziemią w przekonaniu, że dron jest

stabilniejszy. Stabilność optyczna może być zaburzona przez turbulencje odbite od ziemi (szczególnie na trawiastych powierzchniach). Optimum szkolenia hover: 1,5–2 m AGL.

3.7 Przykłady obliczeniowe

Zadanie 3.3 – Minimalna siła ciągu do hover

Dron waży 850 g (0,85 kg). Ile co najmniej musi wynosić ciąg (suma wszystkich silników), aby dron mógł zawisić?

```
W = m · g = 0,85 · 9,81 = 8,34 N
Warunek hover: T ≥ W
T_min = 8,34 N ≈ 850 gf
Przy T/W = 2 (standard szkolny):
T_wymagany = 2 · 8,34 = 16,68 N ≈ 1700 gf
```

Odpowiedź: przy T/W = 2 silniki muszą generować łącznie co najmniej 1700 gf ciągu. Każdy z 4 silników: min. 425 gf.

Zadanie 3.4 – Wpływ ładunku na T/W

Ten sam dron (850 g ciągu max 1700 gf, T/W = 2) zostaje wyposażony w kamerę 200 g.

```
Nowa masa: 0,85 + 0,20 = 1,05 kg
Nowy ciężar: 1,05 · 9,81 = 10,30 N ≈ 1050 gf
T/W po dołączeniu kamery:
T/W = 1700 / 1050 = 1,62
Margines ciągu zmniejszył się z 2,0 do 1,62.
Wniosek: dron jest sterowny, ale ma mniejszy margines
na reakcję w wietrze lub manewry.
```

▶ BŁĄD Ś

Średniozaawansowani montują coraz cięższe kamery, gimble i

akumulatory bez przeliczenia nowego T/W. Gdy T/W spada poniżej 1,5, dron staje się powolny w reakcjach, trudny do utrzymania w wietrze i niebezpieczny w przypadku awarii jednego silnika.

3.8 Checklista rozdziału

Rozdział 3 – Checklista kompetencji

- [ ] Potrafię narysować schemat 4 sił i oznaczyć ich kierunki
- [ ] Rozumiem, jak wirnik generuje ciąg (III zasada Newtona)
- [ ] Rozumiem różnicę i uzupełnienie modeli Bernoulliego i

```
Newtona
```

- [ ] Wiem, dlaczego silniki są parami CW/CCW

- [ ] Potrafię obliczyć minimalny ciąg dla danej masy drona
- [ ] Rozumiem efekt ziemi i jego konsekwencje dla

> startu/lądowania

- [ ] Potrafię interpretować wartość FM dla danego śmigła
- [ ] Obliczam zmianę T/W po dołączeniu ładunku

3.9 Typowe błędy

> ▶ BŁĄD P
> **„Gaz = prędkość pozioma."**
>
> Gaz kontroluje ciąg pionowy. Prędkość pozioma to efekt przechylenia platformy. Brak rozróżnienia prowadzi do niekontrolowanych zmian wysokości przy próbie przyspieszenia.

> ▶ BŁĄD P
> **Zamiana śmigieł CW i CCW.**

▶ Zawsze sprawdzaj oznaczenia. Śmigło CCW zamontowane na silniku CW odkręci się w locie – katastrofa nieunikniona.

> ▶ BŁĄD Ś
> **Ignorowanie efektu ziemi przy ocenie osiągów.**
>
> Dron latający tuż nad ziemią ma pozornie lepszy ciąg. Test mocy na ławce pomiarowej lub hover przy 3+ m AGL daje rzeczywiste dane osiągów.

> ▶ PUŁAPKA S
> **Pomiar ciągu tylko przy nowym sprzęcie.**
>
> Zużyte łożyska silnika, uszkodzone krawędzie śmigła i niewyważenie obniżają FM i ciąg o 10–20%. Plan przeglądów powinien obejmować cykliczny test ciągu na stanowisku pomiarowym.

3.10 Pytania kontrolne

1. Podaj warunek matematyczny konieczny do hoveru drona. Co się dzieje, gdy ciąg jest o 5% niższy od ciężaru?
2. Wyjaśnij, dlaczego śmigło o większej średnicy jest efektywniejsze

energetycznie niż śmigło małe przy tym samym ciągu.

3. Jaką rolę pełni układ CW/CCW silników w kontroli osi yaw?
4. Co to jest Figure of Merit i jak interpretujesz wartość FM = 0,55?
5. Dron waży 1200 g, maksymalny ciąg to 2800 gf. Oblicz T/W. Czy jest to wystarczające dla lotu szkolnego?
6. Opisz efekt ziemi: na jakiej wysokości występuje i jakie ma praktyczne konsekwencje dla operatora podczas lądowania?
7. Jak zmieni się zachowanie drona w wietrze, jeśli dołączymy ładunek 300 g do platformy o T/W = 2,5?

3.11 Mini-test

Pytanie 1. Która zasada fizyki bezpośrednio wyjaśnia powstawanie ciągu wirnika BSP?

- A) Zasada zachowania energii
- B) I zasada dynamiki Newtona
- C) III zasada dynamiki Newtona (poprawna)
- D) Zasada Archimedesa

Pytanie 2. Dron zawisa w miejscu. Który z poniższych warunków jest spełniony?

- A) T > W
- B) T = W (poprawna)
- C) T < W
- D) T = 0

Pytanie 3. Figure of Merit = 0,72 oznacza, że:

- A) 72% mocy elektrycznej jest zamieniane na użyteczny ciąg (poprawna)
- B) Śmigło obraca się z prędkością 7200 RPM
- C) Dron może nieść ładunek 720 g
- D) Sprawność silnika wynosi 72%

Pytanie 4. Dlaczego w quadcopterze dwa silniki kręcą się CW, a dwa CCW?

- A) Aby zwiększyć ciąg
- B) Aby znosić wzajemne momenty żyroskopowe i umożliwić sterowanie yaw (poprawna)
-

C) Aby zmniejszyć pobór prądu

D) Ze względu na wytrzymałość przekładni Pytanie 5. Efekt ziemi (Ground Effect) wpływa na dron w sposób:

- A) Zmniejsza ciąg przy locie nisko nad ziemią
- B) Zwiększa opór aerodynamiczny
- C) Zwiększa sprawność wirnika i ciąg przy H < 1× średnica śmigła (poprawna)
- D) Powoduje utratę stabilności przy każdej wysokości

3.12 Najważniejsze wnioski operacyjne

> ★ **WNIOSEK 1**
> Hover = T równa się W. Każde odchylenie od tej równowagi to ruch pionowy. Płynne sterowanie gazem = płynna kontrola wysokości. To fundamentalna umiejętność nabywana w symulatorze. ★

> ★ **WNIOSEK 2**
> Większe śmigło = lepsza sprawność (wyższe FM) = dłuższy czas lotu. Kompromis: większe śmigło = większa bezwładność = wolniejsza odpowiedź na zmiany sterowania. Dobór śmigła to zawsze balans.

> ★ **WNIOSEK 3**
> Układ CW/CCW śmigieł nie jest przypadkowy – to mechanizm sterowania yaw i kompensacji momentów żyroskopowych. Błąd montażu śmigła = natychmiastowa awaria w locie. ★

> ★ **WNIOSEK 4**
> Każdy dodany gram ładunku obniża T/W i zmniejsza margines bezpieczeństwa. Przed lotem z nowym wyposażeniem ZAWSZE przelicz nowe T/W i oceń ryzyko operacyjne. ★

> ★ **WNIOSEK 5**
> Efekt ziemi przy starcie i lądowaniu może zmylić ocenę rzeczywistego zachowania drona. Hover szkolny wykonuj na wysokości 1,5–2 m AGL, poza strefą efektu ziemi. Źródła do rozdziału 3:

- Leishman, J.G. – Principles of Helicopter Aerodynamics, Cambridge

University Press, 2006, ISBN 978-0521858601

- Mahony, R., Kumar, V., Corke, P. – Multirotor Aerial Vehicles: Modeling,

Estimation, and Control of Quadrotor, IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012,

- doi:10.1109/MRA.2012.2206474
- Stepniewski, W.Z., Keys, C.N. – Rotary-Wing Aerodynamics, Dover

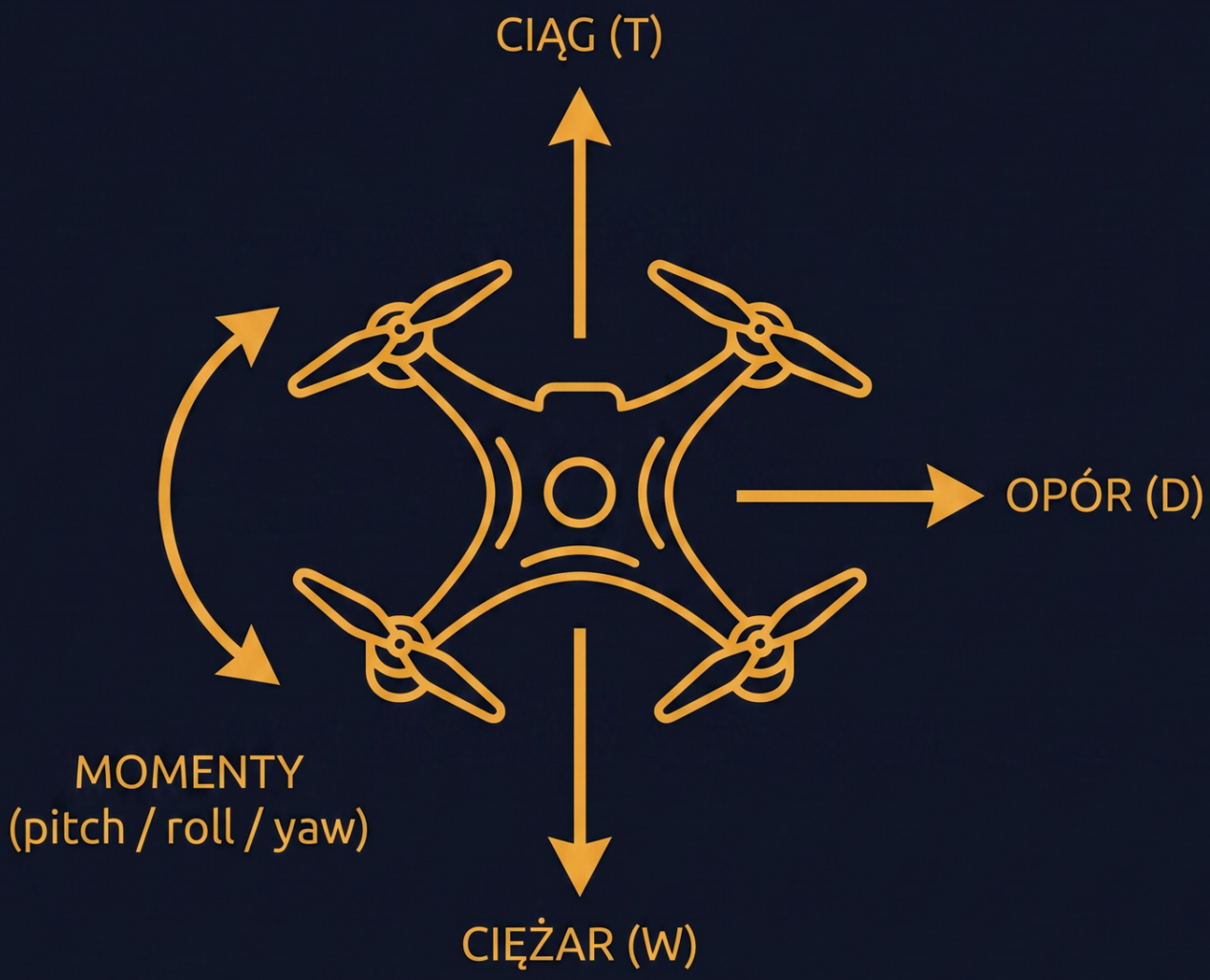
Publications, 1984

- Betaflight Wiki – Motor and Propeller Theory,
- github.com/betaflight/betaflight/wiki
- EASA – Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems, AMC/GM to

Part-UAS,

- easa.europa.eu

CZTERY SIŁY DZIAŁAJĄCE NA DRONA



Hover gdy T = W; wznoszenie gdy T > W.

ROZDZIAŁ 4

Siły działające na dron – ciąg, ciężar, opór, momenty

Część: I – Fundamenty
Czas nauki szacowany: 150 minut

4.0 Cele szkoleniowe

Po ukończeniu tego rozdziału kursant:

1. Definiuje i oblicza ciąg, ciężar, opór aerodynamiczny oraz momenty sił w odniesieniu do multirotora.
2. Stosuje wzór na opór aerodynamiczny i interpretuje wpływ prędkości i geometrii na jego wartość.
3. Opisuje sześć stopni swobody (6-DOF) i przyporządkowuje każdemu osie i ruchy.
4. Wyjaśnia pojęcie obciążenia wirnikowego (disk loading) i jego wpływ na efektywność energetyczną.
5. Oblicza moc potrzebną do hoveru na podstawie parametrów platformy.
6. Interpretuje wpływ wiatru na bilans sił i wymagany margines ciągu.

4.1 Ciąg (Thrust) – definicja, wzory, pomiar

Definicja i jednostki

DEF
Ciąg (T)
Wypadkowa siła aerodynamiczna generowana przez układ wirników, skierowana prostopadle do płaszczyzny obrotu śmigła. W hoverie skierowana pionowo w górę. Jednostki stosowane w praktyce dronowej:

JEDNOSTKA	SYMBOL	PRZELICZENIE	STOSOWANE W
Niuton	N	1 N = 101,97 gf	Obliczenia inżynierskie

Gram-siła	gf	1 gf = 0,00981 N	Specyfikacje producentów
Kilogram-siła	kgf	1 kgf = 9,81 N	Duże platformy

> ⚠ **UWAGA**
> **Producenci silników podają ciąg w gramach (gf), nie w Niutonach. Przy** obliczeniach inżynierskich zawsze przeliczaj na układ SI.

Wzór ogólny na ciąg wirnika

Z teorii dysku aktuacyjnego (Rankine-Froude):

```
  T = √(2 · ρ · A · P²)
   lub równoważnie:
   T = 2 · ρ · A · v_i²
gdzie:
   T   – ciąg [N]
   ρ   – gęstość powietrza [kg/m³]   (1,225 kg/m³ przy ISA, 0
m MSL)
   A   – powierzchnia dysku śmigła [m²]   A = π · (D/2)²
   v_i – prędkość wywołana (induced velocity) [m/s]
   P   – moc mechaniczna wirnika [W]
```

Pomiar ciągu w praktyce

Precyzyjne wartości ciągu dla konkretnej konfiguracji silnik–śmigło–ESC–bateria uzyskuje się z:

1. Stanowisko pomiarowe (thrust stand) – silnik zamocowany na wadze,

pomiar ciągu przy rosnącym throttle. Standardowe narzędzia: RCbenchmark Series 1520/1780.

2. Bazy danych producentów – np. T-Motor, Emax, Brotherhobby podają

szczegółowe wykresy ciąg/prąd/RPM w dokumentacji.

3. Kalkulatory online – ecalc.ch, rcplanes.online pozwalają szacować ciąg na

podstawie parametrów silnika i śmigła. Przykład obliczeniowy 4.1 – ciąg wirnika z parametrów geometrycznych: Śmigło 7" (177,8 mm), ρ = 1,225 kg/m³, v_i = 10 m/s.

```
A = π · (0,0889)² = π · 0,007903 = 0,02483 m²
T = 2 · ρ · A · v_i²
  = 2 · 1,225 · 0,02483 · 100
  = 6,08 N ≈ 620 gf   (jeden wirnik)
4 wirniki: T_total = 4 · 6,08 = 24,3 N ≈ 2479 gf
```

4.2 Ciężar (Weight) – masa całkowita systemu

DEF

Ciężar (W)

Siła grawitacji działająca na masę całkowitą systemu BSP (MTOM). Skierowana pionowo w dół.

$$W = m \cdot g$$

gdzie:
- W – ciężar [N]
- m – masa całkowita (MTOM) [kg]
- g – przyspieszenie ziemskie = 9,81 m/s²

Składowe masy systemu BSP

```
MTOM = m_rama + m_silniki + m_ESC + m_FC + m_bateria
     + m_kamera + m_anteny + m_przewody +
m_elementy_montażowe
     + m_ładunek_użyteczny
```

Praktyczna reguła szacowania mas (quadcopter 5"):

PODZESPÓŁ	TYPOWA MASA
Rama karbonowa 5"	60–100 g
4× silnik 2306-2307	4× 30–35 g = 120–140 g
4-w-1 ESC 30A stack	15–25 g
Kontroler lotu F7	8–15 g
Odbiornik RC	5–12 g
VTX analogowy/cyfrowy	10–30 g
Kamera FPV	15–25 g
Bateria 4S 1500 mAh	180–210 g
Przewody, złącza, TPU	20–40 g
MTOM szacowane	~450–600 g

Przykład obliczeniowy 4.2 – ciężar i wymagany ciąg: MTOM = 520 g = 0,520 kg.

W = 0,520 · 9,81 = 5,10 N = 520 gf
T/W = 2 → T_required = 2 · 520 = 1040 gf
Każdy z 4 silników musi dać: 1040 / 4 = 260 gf

4.3 Opór aerodynamiczny (Drag) – wzór, składowe,

- **wpływ prędkości**

DEF

Opór aerodynamiczny (D)

Siła działająca na poruszający się obiekt, skierowana przeciwnie do kierunku ruchu. Wynika z różnicy ciśnień (opór ciśnieniowy) i tarcia lepkości powietrza o powierzchnię (opór tarciowy).

$$D = \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_D \cdot S$$

gdzie:
D – opór aerodynamiczny [N]
ρ – gęstość powietrza [kg/m³]
v – prędkość obiektu względem powietrza [m/s]
C_D – współczynnik oporu aerodynamicznego [-] (bezwymiarowy)
S – powierzchnia czołowa (referencyjna) [m²]

- **Interpretacja zmiennych**

C_D (drag coefficient): Zależy od kształtu obiektu. Typowe wartości dla BSP:

Typ platformy	C_D szacowany	Uwagi
Quadcopter 5" (standardowy)	0,6–0,9	Nieaerodynamiczny kształt, duże opory
Quadcopter 5" (streamlined)	0,4–0,6	Obudowa, zaokrąglone krawędzie
Fixed-Wing (samolot)	0,02–0,05	Profil lotniczy, minimalne opory
VTOL w trybie przekraczania	0,04–0,10	Zależy od geometrii skrzydła

S (powierzchnia czołowa): Dla quadcoptera liczona jako rzut prostopadły do kierunku lotu. Typowo 0,01–0,05 m².

- **Kluczowa cecha oporu: zależność kwadratowa od**
- **prędkości**

Podwojenie prędkości → czterokrotny wzrost oporu:
$D \propto v^2$

```
Przykład:
v = 5 m/s:   D ∝ 25
v = 10 m/s:  D ∝ 100  (4× więcej)
```

∝

```
v = 20 m/s:  D ∝ 400  (16× więcej)
```

Przykład obliczeniowy 4.3 – opór przy prędkości maksymalnej: Quadcopter, v = 20 m/s, C_D = 0,75, S = 0,018 m², ρ = 1,225 kg/m³.

```
D = ½ · 1,225 · 400 · 0,75 · 0,018
  = ½ · 1,225 · 400 · 0,0135
  = 3,31 N = 337 gf
To oznacza: przy v = 20 m/s silniki muszą wygenerować
dodatkowe 337 gf "do przodu" (jako składowa pozioma
ciągu),
co zmniejsza dostępny margines ciągu pionowego.
```

★ **WNIOSEK**

Prędkość wysoka dramatycznie zwiększa zapotrzebowanie na moc. ★ Dron lecący 20 m/s zużywa wielokrotnie więcej energii niż hover. Planowanie zasięgu MUSI uwzględniać prędkość przelotową.

4.4 Momenty sił – pitch, roll, yaw

Dron w przestrzeni 3D jest opisywany przez trzy osie obrotu:

```
        Z (góra, yaw)
        ↑
        |
Y (lewo)──┼──→ X (przód, pitch)
  (roll)
PITCH: obrót wokół osi Y  → przód/tył
ROLL:  obrót wokół osi X  → lewo/prawo
YAW:   obrót wokół osi Z  → obrót poziomy
```

Jak multirotor generuje momenty?

RUCH	MECHANIZM	SILNIKI DZIAŁAJĄCE
Pitch	Silniki tylne przyspieszają, przednie	Para tył > para przód
forward	zwalniają Silniki przednie przyspieszają, tylne	
Pitch back	zwalniają	Para przód > para tył Para lewa > para

Roll right	Silniki lewe przyspieszają, prawe zwalniają	prawa Para prawa > para
Roll left	Silniki prawe przyspieszają, lewe zwalniają	lewa
Yaw right	Silniki CW zwalniają, CCW przyspieszają	Para CCW > para CW
Yaw left	Silniki CCW zwalniają, CW przyspieszają	Para CW > para CCW
Throttle up	Wszystkie silniki przyspieszają równo	↑ Wszystkie
Throttle	Wszystkie silniki zwalniają równo	↓ Wszystkie
down		

Moment siły – wzór

DEF

Moment siły (torque, τ)

Moment siły względem osi obrotu, równy iloczynowi siły i ramienia:

$$\tau = F \cdot r \cdot \sin(\alpha)$$

gdzie:
- τ – moment siły [N·m]
- F – siła [N]
- r – ramię momentu [m] (odległość od osi do punktu przyłożenia siły)
- α – kąt między wektorem siły a ramieniem [°]

W quadcopterze o rozstawie osi WB ramię momentu dla pitch/roll wynosi WB/2 (odległość od środka do silnika). Przykład obliczeniowy 4.4 – moment pitch: Quadcopter, WB = 220 mm = 0,11 m na osi (od środka do silnika). Różnica ciągu przód-tył: ΔT = 0,5 N.

$\tau_{pitch} = \Delta T \cdot r = 0{,}5 \cdot 0{,}11 = 0{,}055$ N·m = 55 mN·m
Moment bezwładności quadcoptera 5" wokół osi pitch:
$I_{pitch} \approx 0{,}002$ kg·m²
Przyspieszenie kątowe: $\alpha = \tau / I = 0{,}055 / 0{,}002 = 27{,}5$ rad/s²
≈ 1575 °/s² → szybka odpowiedź na sterowanie

4.5 Równanie ruchu drona w 6 stopniach swobody

(6-DOF)

DEF

6 stopni swobody (6-DOF)

Pełny opis ruchu ciała sztywnego w przestrzeni 3D wymaga 6 zmiennych: 3 translacyjnych (x, y, z) i 3 rotacyjnych (pitch, roll, yaw).

```
TRANSLACJE:          ROTACJE:
  x – ruch wzdłuż      φ (phi)   – roll
  y – ruch w bok       θ (theta) – pitch
  z – ruch pionowy     ψ (psi)   – yaw
```

Pełne równania ruchu (postać uproszczona, bez sprzężeń):

```
Translacje (II zasada Newtona):
   m · ẍ = T · sin(θ) · cos(ψ) - D_x
   m · ÿ = T · sin(φ) · cos(ψ) - D_y
   m · z̈ = T · cos(φ) · cos(θ) - m · g - D_z
Rotacje (równania Eulera):
   I_x · φ̈ = τ_φ - (I_z - I_y) · θ̇ · ψ̇
```

◌

```
   I_y · θ̈ = τ_θ - (I_x - I_z) · φ̇ · ψ̇
   I_z · ψ̈ = τ_ψ - (I_y - I_x) · φ̇ · θ̇
gdzie:
   m        – masa [kg]
   I_x,y,z  – momenty bezwładności wokół osi [kg·m²]
   T        – ciąg wypadkowy [N]
   D_x,y,z  – składowe oporu [N]
   τ_φ,θ,ψ  – momenty sterujące [N·m]
   φ̈,θ̈,ψ̈ – przyspieszenia kątowe [rad/s²]
```

Po ludzku: Te równania rozwiązuje kontroler lotu (FC) setki razy na sekundę. Twój PID to numeryczny solver tych równań działający w czasie rzeczywistym. Kiedy widzisz oscylacje drona, oznacza to, że parametry solvera (PID) są źle dobrane do momentów bezwładności konkretnej platformy.

▶ BŁĄD Ś

Operatorzy konfigurujący PID bez rozumienia 6-DOF traktują P, I, D jak

magiczne pokrętła. Wiedza o tym, że P reaguje na błąd chwilowy, I na skumulowany, a D na tempo zmian błędu, jest bezpośrednio wyprowadzona z tych równań. Rozdział 35 rozwija to w pełni.

4.6 Obciążenie wirnikowe (Disk Loading)

DEF

Obciążenie wirnikowe (DL – Disk Loading)

Stosunek ciężaru platformy do sumarycznej powierzchni dysków wirników. Niższe DL oznacza wyższą sprawność i cichszą pracę. Wyższe DL oznacza wyższe zapotrzebowanie na moc i krótszy czas lotu.

$$DL = W / A_{total} = (m \cdot g) / (n \cdot \pi \cdot r^2)$$

gdzie:

- DL – obciążenie wirnikowe [N/m² lub Pa]
- W – ciężar platformy [N]
- A_{total} – sumaryczna powierzchnia dysków [m²]
- n – liczba wirników [-]
- r – promień śmigła [m]

Przykład obliczeniowy 4.5 – obciążenie wirnikowe: Quadcopter 5", m = 0,52 kg, śmigła 5" (r = 0,0635 m), n = 4.

$$A_{total} = 4 \cdot \pi \cdot (0{,}0635)^2 = 4 \cdot 0{,}01267 = 0{,}05068 \text{ m}^2$$

$$W = 0{,}52 \cdot 9{,}81 = 5{,}10 \text{ N}$$

$$DL = 5{,}10 / 0{,}05068 = 100{,}6 \text{ N/m}^2 \approx 100 \text{ Pa}$$

Dla porównania:

DJI Mavic 3 (5-calowe śmigła, m ≈ 0,895 kg): DL ≈ ~175 Pa

Hexacopter inspekcyjny 15" (m ≈ 4 kg): DL ≈ ~40 Pa

Tabela porównawcza DL dla różnych typów platform

Typ platformy	Disk Loading [N/m²]	Sprawność energetyczna	Hałas
Duży helikopter (AS350)	~150–200	Wysoki	Niski
Quadcopter wyścigowy 5"	80–120	Niska	Wysoki
Quadcopter fotografia 7"	40–70	Średnia	Średni
Hexacopter inspekcyjny 15"	20–45	Wysoka	Niski
Fixed-wing (w locie)	2–8	Bardzo wysoka	Niski

★ WNIOSEK

Dron z niskim DL (duże śmigła, mała masa) lata dłużej, jest cichszy i ★ bardziej odporny na wiatr. Dron z wysokim DL (małe śmigła, duża masa) zużywa energię nieefektywnie. Przy wyborze platformy do misji długodystansowej zawsze optymalizuj DL.

4.7 Moc potrzebna do hoveru – obliczenia

Z teorii dysku aktuacyjnego, minimalna moc idealna do utrzymania ciągu T:

```
  P_ideal = T^(3/2) / √(2 · ρ · A_total)
   Moc rzeczywista (z uwzględnieniem sprawności FM):
   P_actual = P_ideal / FM
gdzie:
   P_ideal  – moc idealna [W]
   P_actual – moc rzeczywista pobrana przez silniki [W]
   FM       – Figure of Merit [-]   (typowo 0,60–0,75)
```

Przykład obliczeniowy 4.6 – moc hoveru: Quadcopter: m = 0,52 kg, T = W = 5,10 N, śmigła 5", A_total = 0,05068 m², ρ = 1,225 kg/m³, FM = 0,65.

```
P_ideal = 5,10^(3/2) / √(2 · 1,225 · 0,05068)
        = 11,51 / √0,12417
        = 11,51 / 0,3524
        = 32,7 W
 P_actual = 32,7 / 0,65 = 50,3 W
 Przy baterii 4S (14,8 V):
 I_hover = P_actual / U = 50,3 / 14,8 = 3,40 A
 Przy baterii 1500 mAh = 1,5 Ah:
 Czas lotu teoretyczny = 1,5 / 3,40 · 60 = 26,5 minut
 Czas lotu praktyczny (80% pojemności + straty):
 t = 0,80 · 26,5 = ~21 minut
```

▶ PUŁAPKA D

Obliczony czas lotu to wartość przy czystym hovowaniu. Lot

▶ dynamiczny (przyspieszenia, wiatr, manewry) zwiększa pobór prądu o 30–80%. Planuj czas misji z marginesem min. 20% pojemności baterii na powrót i lądowanie.

4.8 Wpływ wiatru na bilans sił

Wiatr zmienia bilans sił działających na drona. Operator musi rozumieć to ilościowo, aby ocenić margines bezpieczeństwa.

Wiatr czołowy (headwind)

Dron pochylony do przodu kompensuje wiatr. Część ciągu pionowego zostaje zamieniona na składową poziomą.

```
Przy kącie pochylenia θ (pitch):
   Składowa pionowa:    T_z = T · cos(θ)
   Składowa pozioma:    T_x = T · sin(θ)
   Warunek utrzymania wysokości: T · cos(θ) ≥ W
   Maksymalny kąt pochylenia:    θ_max = arccos(W/T)
```

Przykład obliczeniowy 4.7 – maksymalny kąt i prędkość w wietrze: T/W = 2,0 (typowy dron szkolny).

```
  θ_max = arccos(1/2) = arccos(0,5) = 60°
   W praktyce: kąt operacyjny ograniczony przez FC do ~25–30°
   (bezpieczeństwo, widzialność, stabilność)
   Przy θ = 30° i T = 2·W:
   T_z = 2W · cos(30°) = 2W · 0,866 = 1,73W  → margines nad
W: 0,73W
   T_x = 2W · sin(30°) = 2W · 0,5   = W      → siła pozioma =
W
   Prędkość równoważona tym T_x (z wzoru na opór):
   T_x = D = ½ · ρ · v² · C_D · S
   v = √(2 · T_x / (ρ · C_D · S))
     = √(2 · 5,10 / (1,225 · 0,75 · 0,018))
     = √(10,20 / 0,01654)
     = √616,7 = 24,8 m/s ≈ 89 km/h
```

Wniosek z obliczeń: dron z T/W = 2 może teoretycznie lecieć pod wiatr 89 km/h przy kącie pitch 30°. W praktyce FC ogranicza kąt, a przy silnym wietrze bateria wyczerpuje się wielokrotnie szybciej.

> ▶ **PUŁAPKA D**
> **Silny wiatr czołowy może utrzymać drona w pozornym bezruchu**

▶ (hover nad punktem) przy pełnym gazie. Operator traci margines na awarie i manewr. Zasada: jeśli bateria spada podwójnie szybciej niż normalnie – wiatr jest za silny dla tej misji.

4.9 Checklista rozdziału

Rozdział 4 – Checklista kompetencji

- [ ] Potrafię obliczyć ciąg wirnika ze wzoru teorii dysku

```
aktuacyjnego
```

∝

- [ ] Znam wzór na opór aerodynamiczny i rozumiem zależność D

```
v²
```

- [ ] Potrafię wymienić 6-DOF i przyporządkować osie do ruchów

drona

- [ ] Rozumiem mechanizm generowania pitch, roll i yaw w

multirotorze

- [ ] Obliczam obciążenie wirnikowe DL i interpretuję jego

wartość

- [ ] Obliczam moc hoveru i szacuję czas lotu z danych baterii
- [ ] Rozumiem wpływ kąta pitch na składowe ciągu przy wietrze
- [ ] Potrafię ocenić, kiedy wiatr przekracza bezpieczny

margines misji

4.10 Typowe błędy

▶ BŁĄD P

Ignorowanie zależności oporu od prędkości kwadratowej.

Operator leci z dużą prędkością, zaskoczony szybkim spadkiem baterii. Przy dwukrotnym wzroście prędkości pobór mocy na pokonanie oporu rośnie czterokrotnie. Planuj prędkość przelotową, nie maksymalną.

▶ BŁĄD P

Nieuwzględnianie składowych masy MTOM.

▶ Kursanci wpisują masę ramy bez baterii, bez kamery, bez ładunku. MTOM to absolutnie wszystko. Każdy gram ma swoją konsekwencję w T/W i czasie lotu. ▶ Brak korekty obliczeń czasu lotu dla lotu dynamicznego.

▶ BŁĄD Ś

Obliczony czas hoveru to górna granica. Każde przyspieszenie, manewr, lot w wietrze to dodatkowy pobór prądu. Stosuj współczynnik korekcji 0,6–0,75 do obliczeń planowania misji.

▶ PUŁAPKA S

Ocena sprawności silnika bez pomiaru DL.

▶ Porównywanie „czasu lotu" dwóch dronów bez uwzględnienia różnic w DL jest bez sensu. Zawsze normalizuj do tych samych warunków (ta sama masa systemu, te same warunki atmosferyczne).

> ▶ **PUŁAPKA D**
>
> **Lot na granicy możliwości przy wietrze.**
>
> Gdy dron kompensuje wiatr przy dużym kącie pitch i wysokim throttle – nie ma marginesu na awarię ani na ucieczkę od przeszkody. Decyzja GO/NO-GO musi uwzględniać margines ciągu na wiatr.

4.11 Pytania kontrolne

1. Dron waży 1,1 kg. Oblicz jego ciężar w Niutonach i wymagany ciąg dla T/W = 2,2.

2. Jak zmieni się opór aerodynamiczny, jeśli dron przyspieszy z 10 m/s do 15 m/s? Oblicz stosunek.

3. Wymień 6 stopni swobody multirotora. Który z nich jest sterowany inaczej niż pozostałe (bez zmiany sumarycznego ciągu)?

4. Co oznacza niskie obciążenie wirnikowe (DL) i dlaczego jest pożądane w dronach inspekcyjnych?

5. Oblicz teoretyczny czas lotu dla: m = 1,2 kg, bateria 6S 3000 mAh, I_hover = 8 A, margines 20%.

6. Dlaczego przy silnym wietrze czołowym czas lotu skraca się dramatycznie pomimo braku zmiany trasy?

7. Jaki kąt pitch maksymalny jest możliwy dla drona z T/W = 1,8? Czy to bezpieczna wartość T/W dla misji w wietrze?

4.12 Mini-test

Pytanie 1. Opór aerodynamiczny drona przy prędkości 20 m/s jest ile razy większy niż przy 10 m/s?

- A) 2 razy
- B) 3 razy
- C) 4 razy (poprawna)

- D) 8 razy

Pytanie 2. Obciążenie wirnikowe (Disk Loading) wyrażamy jako:

- A) Stosunek masy do liczby silników
- B) Stosunek ciężaru do sumarycznej powierzchni dysków wirników

(poprawna)

- C) Stosunek ciągu do masy
- D) Moc podzieloną przez ciąg

Pytanie 3. Kontroler lotu generuje ruch pitch forward przez:

- A) Zwiększenie obrotów silników przednich
- B) Zmniejszenie obrotów wszystkich silników
- C) Zwiększenie obrotów silników tylnych przy zmniejszeniu przednich

(poprawna)

- D) Zwiększenie obrotów silników lewych

Pytanie 4. Dron w silnym wietrze czołowym utrzymuje pozycję przy pełnym throttle. Jakie jest główne ryzyko operacyjne?

- A) Przegrzanie kamery
- B) Utrata sygnału GPS
- C) Brak marginesu ciągu na manewry i awarię silnika (poprawna)
- D) Przekroczenie pułapu operacyjnego

Pytanie 5. Moc idealna do hoveru obliczana jest ze wzoru teorii dysku aktuacyjnego. Jeśli zwiększysz śmigła do większej średnicy (A rośnie) przy tej samej masie drona, moc idealna:

- A) Wzrośnie proporcjonalnie do A
- B) Pozostanie bez zmian
- C) Zmaleje (poprawna)
- D) Wzrośnie do kwadratu A

4.13 Najważniejsze wnioski operacyjne

★

★ **WNIOSEK 1**

Opór aerodynamiczny rośnie z kwadratem prędkości. Podwojenie prędkości przelotowej = czterokrotne zapotrzebowanie na siłę poziomą = drastyczne skrócenie czasu lotu. Optymalna prędkość przelotowa ≠ prędkość maksymalna. ★

★ **WNIOSEK 2**

6-DOF to matematyczny opis tego, co czujesz na drążkach. Kontroler lotu rozwiązuje te równania 1000 razy na sekundę. Zrozumienie równań daje wgląd w tuning PID i zachowanie drona w skrajnych warunkach. ★

★ **WNIOSEK 3**

Obciążenie wirnikowe DL to wskaźnik efektywności platformy. Im niższe DL (większe śmigła, mniejsza masa), tym dłuższy czas lotu i lepsze zachowanie w wietrze. Projektując platformę, DL jest jednym z pierwszych parametrów do optymalizacji. ★

★ **WNIOSEK 4**

Moc hoveru obliczona ze wzorów daje wyjściowy punkt planowania misji. Rzeczywisty czas lotu to zawsze 60–80% wartości teoretycznej – stosuj ten współczynnik obowiązkowo.

★ **WNIOSEK 5**

Wiatr zmienia bilans sił. Decyzja GO/NO-GO musi uwzględniać nie tylko to, czy dron da radę dolecieć – ale czy ma margines ciągu na awarię, manewr i powrót z rezerwą baterii.
Źródła do rozdziału 4:

- Leishman, J.G. – Principles of Helicopter Aerodynamics, Cambridge

University Press, 2006

- Mahony, R., Kumar, V., Corke, P. – Multirotor Aerial Vehicles, IEEE Robotics

& Automation Magazine, 2012,

- doi:10.1109/MRA.2012.2206474
- Bouabdallah, S. – Design and control of quadrotors with application to

autonomous flying, EPFL Thesis No. 3727, 2007,

- epfl.ch
- ecalc.ch – Multirotor Calculator,
- ecalc.ch/xcoptercalc
- RCbenchmark – Thrust Stand and Power Analyzer, dokumentacja techniczna,
- rcbenchmark.com
- Anderson, J.D. – Introduction to Flight, McGraw-Hill, 2015, ISBN

978-0078027673

ROZDZIAŁ 5

Stabilność i sterowność

Część: I – Fundamenty
Czas nauki szacowany: 120 minut

5.0 Cele szkoleniowe

Po ukończeniu tego rozdziału kursant:

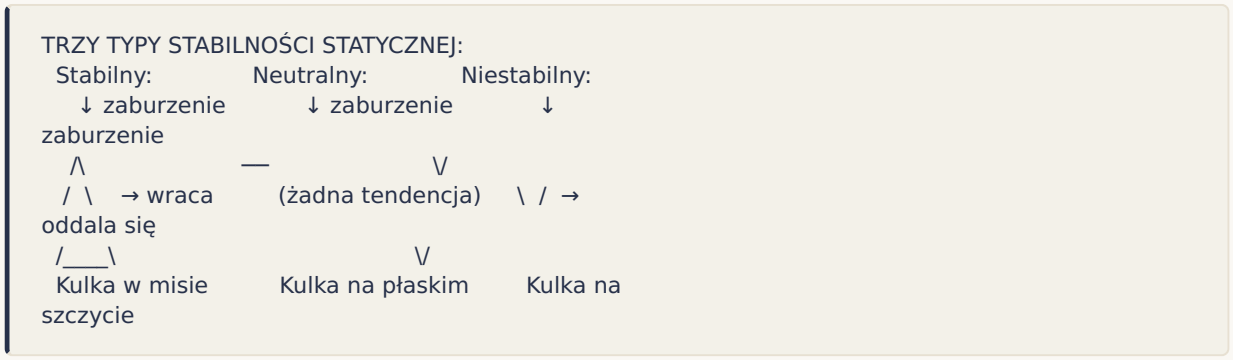
1. Rozróżnia stabilność statyczną i dynamiczną oraz podaje przykłady obu typów w kontekście BSP.
2. Wyznacza środek ciężkości (CG) platformy i ocenia jego wpływ na charakterystyki lotu.
3. Opisuje cztery osie sterowania (roll, pitch, yaw, throttle) i ich mechanizm w multirotorze.
4. Charakteryzuje tryby lotu (Acro, Angle, Horizon, GPS/Position Hold) i wskazuje właściwy tryb dla danego etapu szkolenia.
5. Wyjaśnia zasadę działania pętli sprzężenia zwrotnego IMU i jej rolę w stabilizacji.
6. Interpretuje wpływ nieprawidłowego CG na zachowanie drona i przeprowadza korektę.

5.1 Stabilność statyczna i dynamiczna

Stabilność to zdolność układu do powrotu do stanu równowagi po zaburzeniu. W kontekście BSP wyróżniamy dwa typy.

Stabilność statyczna

> DEF
> **Stabilność statyczna**
> Natychmiastowa tendencja układu po zaburzeniu: czy wraca do równowagi (stabilny statycznie), pozostaje w nowym położeniu (neutralny statycznie), czy oddala się dalej (niestabilny statycznie)?



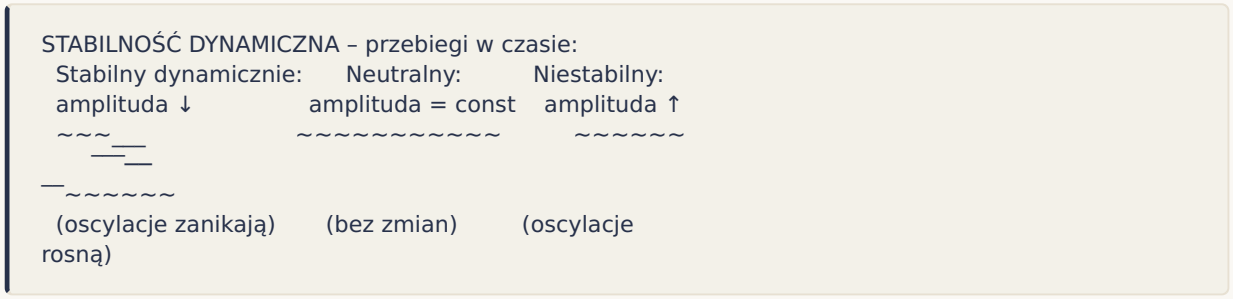
Multirotor bez aktywnej stabilizacji (FC wyłączony) jest statycznie niestabilny – każde minimalne zaburzenie samoczynnie narasta. To fundamentalna różnica od stabilnego samolotu szybowcowego. Konsekwencja praktyczna: Dron bez działającego FC i aktywnych algorytmów stabilizacji natychmiast się rozbije . FC nie jest „wygodnym dodatkiem" – jest warunkiem koniecznym lotu.

Stabilność dynamiczna

DEF

Stabilność dynamiczna

Zachowanie układu w czasie po zaburzeniu: czy oscylacje zanikają (stabilny dynamicznie), utrzymują stałą amplitudę (neutralny), czy narastają (niestabilny dynamicznie)?



W dronach FPV niestabilność dynamiczna objawia się jako oscylacje PID – drgania ramy widoczne w locie i na obrazie FPV. Są wynikiem zbyt wysokich wartości P lub D w konfiguracji kontrolera lotu.

▶ BŁĄD P

Początkujący myślą, że tryb Angle/GPS „stabilizuje drona". To prawda, ale

▶ stabilizacja aktywna (elektroniczna) nie zastępuje zrozumienia, dlaczego dron jest z natury niestabilny. Gdy FC zawiedzie, operator musi wiedzieć, czego się spodziewać.

5.2 Środek ciężkości (CG) – wyznaczanie i wpływ na lot

DEF

Środek ciężkości (Center of Gravity, CG)

Punkt, w którym skupia się wypadkowa siła grawitacji działająca na całą masę systemu. W locie – punkt, wokół którego obraca się platforma.

Wyznaczanie CG – metoda praktyczna

Dla quadcoptera w płaszczyźnie poziomej CG wyznacza się balansując ramę na dwóch równoległych podporach (ołówkach, krawędzi stołu):

```
METODA WYZNACZANIA CG (widok z boku):
   ═══════════════════════ ← rama drona (kompletna, z
baterią)
            ↑
         PODPORA
      (tu jest CG jeśli
       rama się balansuje)
  Prawidłowo: CG = geometryczny środek ramy ± 5 mm
  Błąd:       CG przesunięty → dron "ciągnie" w jedną stronę
```

Wpływ CG na charakterystyki lotu

POZYCJA CG	OBJAW W LOCIE	KONSEKWENCJA
Idealnie wyśrodkowany	Hover symetryczny, brak tendencji	Optymalny
Przesunięty do przodu	Dron „nurkuje" nosem, wymaga korekty pitch back	FC kompensuje, skraca czas lotu
Przesunięty do tyłu	Dron unosi nos, wymaga korekty pitch forward	FC kompensuje, skraca czas lotu
Przesunięty w bok	Dron przechyla się, wymaga korekty roll	Trim offset, niesymetryczna praca silników
Zbyt wysoko (góra)	Zmniejszona stabilność obrotowa	Wahania roll/pitch
Zbyt nisko (dół)	Zwiększona stabilność, wolniejsza odpowiedź	Mniej dynamiczny lot

Przykład obliczeniowy 5.1 – wpływ przesunięcia baterii: Quadcopter 5", rama 220 mm, bateria (190 g) przesunięta o 15 mm od centrum do przodu.

```
  Moment niezbalansowania:
  τ = m_bat · g · d = 0,190 · 9,81 · 0,015 = 0,028 N·m = 28
mN·m
  FC kompensuje ten moment przez stały offset throttle:
  para silników tylnych pracuje ~3–5% mocniej niż przednia.
  Skutek: asymetryczne zużycie silników i ESC,
  skrócenie czasu lotu o ~2–4%.
```

▶ **PUŁAPKA S**

Po każdej zmianie podzespołów (nowa bateria, kamera, gimbal)

sprawdź CG fizycznie, nie szacuj „na oko". Przesunięcie o 10 mm może nie być widoczne gołym okiem, ale FC kompensuje je przez cały czas lotu – skracając żywotność silników i ESC.

Korekta CG

```
METODY KOREKCJI CG:
 1. Fizyczne przesunięcie baterii (najlepsza metoda)
   → Taca bateryjna z regulowanym położeniem
 2. Zastosowanie balastu (tylko gdy fizyczne przesunięcie
niemożliwe)
   → Dodaje masę → obniża T/W → niekorzystne
 3. Offset trima w FC (akceptowalne, nie zalecane jako
jedyne)
   → FC kompensuje stały błąd przez nierównomierne
     obciążenie silników
 Zasada: ZAWSZE preferuj fizyczną korekcję CG nad
elektroniczną.
```

5.3 Sterowanie – roll, pitch, yaw, throttle

Multirotor posiada cztery niezależne kanały sterowania. Każdy z nich odpowiada za jeden stopień swobody lub jeden wymiar ruchu.

```
CZTERY KANAŁY STEROWANIA (widok z perspektywy operatora):
 LEWY DRĄŻEK:            PRAWY DRĄŻEK:
 ┌──────────────┐        ┌──────────────┐
 │      ↑       │        │      ↑       │
 │   Throttle   │        │    Pitch     │
 │ ←   YAW   →  │        │ ←  ROLL   →  │
 │    (góra)    │        │    (dół)     │
 └──────────────┘        └──────────────┘
 Tryb MODE 2 (najpopularniejszy w Europie)
```

Szczegółowy opis kanałów

THROTTLE (przepustnica)

- Lewy drążek – oś pionowa
- Kontroluje sumaryczny ciąg wszystkich silników
- W górę: wszystkie silniki przyspieszają → dron wznosi się
- W dół: wszystkie silniki zwalniają → dron opada
- W Acro: throttle = bezpośrednia moc; w Angle/GPS: auto-utrzymanie wysokości ROLL (przechylenie boczne)
- Prawy drążek – oś pozioma
- W prawo: lewe silniki przyspieszają, prawe zwalniają → dron przechyla się prawym skrzydłem w dół → ruch w prawo
- W lewo: odwrotnie PITCH (pochylenie podłużne)
- Prawy drążek – oś pionowa
- Do przodu: tylne silniki przyspieszają, przednie zwalniają → dron pochyla nos w dół → ruch do przodu
- Do tyłu: odwrotnie

YAW (obrót wokół osi pionowej)

- Lewy drążek – oś pozioma
- W prawo: silniki CCW przyspieszają, CW zwalniają → dron obraca się w prawo (zgodnie z ruchem wskazówek)
- W lewo: odwrotnie

Tryby sterowania MODE 1 vs MODE 2

ELEMENT	MODE 1	MODE 2
Lewy drążek pionowy	Pitch	Throttle
Lewy drążek poziomy	Yaw	Yaw
Prawy drążek pionowy	Throttle	Pitch
Prawy drążek poziomy	Roll	Roll
Popularność	Azja, stary styl	Europa, USA, dominujący

⚠ UWAGA

Wybierz MODE 2 i pozostań przy nim przez cały czas nauki. Zmiana trybu

po opanowaniu jednego wymaga praktycznie przebudowy pamięci mięśniowej – to wielotygodniowy proces.

5.4 Tryby lotu – charakterystyka i zastosowanie

szkoleniowe

Tryb lotu określa, w jaki sposób FC interpretuje wejścia od pilota i jak aktywnie stabilizuje platformę.

ACRO (Rate Mode / Manual)

DEF

Tryb ACRO

FC stabilizuje tylko prędkość kątową (rate), nie pozycję kątową. Gdy operator puszcza drążki, silniki wracają do zadanego throttle, ale dron pozostaje w ostatnim kącie pochylenia – nie prostuje się samoczynnie.

```
ACRO – zachowanie przy zwolnieniu drążka:
  Roll input ──────────────┐  zwolnienie
  Kąt ramy:    /──────────────────  (pozostaje przechylony)
  W trybie Angle:
  Kąt ramy:    /‾‾\_____________   (wraca do poziomu)
```

Wymagania: Wysokie umiejętności pilotażu. Operator musi samodzielnie utrzymywać orientację poziomą. Zastosowanie: FPV freestyle, wyścigi, zaawansowane manewry. Szkolenie: Dopiero po min. 20h w symulatorze ACRO.

ANGLE (Self-Level / Stabilize)

DEF

Tryb ANGLE

FC utrzymuje maksymalny kąt pochylenia (np. 30–45°). Po zwolnieniu drążka platforma automatycznie powraca do poziomu. Wejścia pilota definiują kąt, nie prędkość kątową.

```
ANGLE – zachowanie przy zwolnieniu drążka:
  Roll input ──────────────┐  zwolnienie
  Kąt ramy:    /‾‾\_____________   (automatyczny powrót do
poziomu)
```

Wymagania: Podstawowe umiejętności. Bezpieczny dla początkujących. Zastosowanie: Szkolenie etap 1–3, fotografia, inspekcja. Ograniczenie: Nie utrzymuje pozycji GPS – przy wietrze dron dryfuje.

HORIZON

DEF

Tryb HORIZON

Hybryd Angle i Acro. Przy małych wychyleniach drążka działa jak Angle (stabilizacja kąta). Przy pełnym wychyleniu umożliwia obroty 360° jak w Acro. Zastosowanie: Przejście między Angle a Acro, freestyle z zachowaniem częściowej asekuracji.

GPS / POSITION HOLD

DEF

Tryb GPS/Position Hold

FC używa danych GPS do utrzymania pozycji poziomej i barometru/optyki do utrzymania wysokości. Dron hover w miejscu bez aktywnego sterowania pilotem.

```
GPS MODE – pętla stabilizacji:
  Pozycja GPS → FC → korekta silników → nowa pozycja GPS
      ↑_____________________________________↓
                (pętla zamknięta)
```

Wymagania: Sygnał GPS min. 6 satelitów, HDOP < 2, skalibrowany kompas. Zastosowanie: Fotografia, inspekcja, misje waypoint, operatorzy początkujący. Ograniczenie: Wymaga dobrego sygnału GPS. W obszarach zurbanizowanych, pod dachem lub przy zakłóceniach – NIEZAWODNY.

⚠ **UWAGA**

GPS nie jest systemem awaryjnym – jest systemem komfortowym. W

obszarach z zakłóceniami magnetycznymi (linie energetyczne, zbrojone konstrukcje) kompas może dryfować, co powoduje niekontrolowany ruch drona nawet w trybie GPS.

Tabela porównawcza trybów lotu

Tryb	Stabilizacja	Utrzymanie pozycji	Poziom trudności	Etap szkolenia
ACRO	Prędkość kątowa	NIE	Zaawansowany	Etap 4–5
ANGLE	Kąt (maks. kąt)	NIE	Podstawowy	Etap 1–3
HORIZON	Hybryd Kąt +	NIE	Średni	Etap 3–4
ALT HOLD	Tylko wysokość		Podstawowy	Etap 2–3

```
          wysokość
GPS/POS              Poziom +
          Kąt + pełna            Łatwy      Etap 1+
HOLD                 wysokość
RETURN TO  Pełna       Automatyczny           Zawsze
                          Brak (auto)
HOME       automatyczna powrót                skonfigurowany
```

▶ BŁĄD P

Wielu początkujących uczy się wyłącznie w trybie GPS i nigdy nie

▶ opanowuje Angle. Gdy GPS zawiedzie (zakłócenia, budynki, lot w pomieszczeniu), dron przełącza się na Angle – i operator nagle nie potrafi nim sterować. Szkolenie MUSI obejmować oba tryby.

5.5 Pętla sprzężenia zwrotnego IMU – jak FC stabilizuje

drona

DEF

Pętla sprzężenia zwrotnego (feedback loop)

Mechanizm sterowania, w którym wyjście systemu (aktualna pozycja drona) jest mierzone i porównywane z wartością zadaną (żądana pozycja), a różnica (błąd) służy do obliczenia korekty.

```
PĘTLA STABILIZACJI FC:
  ZADANA       BŁĄD         REGULATOR      SILNIKI
  POZYCJA  →  [e = set - meas] → [PID] → [ESC+Motory] → DRON
              ↑                                  |
              └──────────── IMU (pomiar) ────────┘
                        (żyroskop, akcelerometr)
```

Częstotliwość pracy pętli

ELEMENT	TYPOWA CZĘSTOTLIWOŚĆ	JEDNOSTKA
Pętla żyroskopu (gyro loop)	4000–32000	Hz
Pętla PID	1000–8000	Hz
Pętla aktualizacji ESC (DShot)	1000–8000	Hz
Pętla GPS	5–10	Hz
Pętla barometru	25–50	Hz

Po ludzku: FC wykonuje 1000–8000 korekt na sekundę. Twoje ręce na drążkach wykonują może 10 korekt na sekundę. FC jest wielokrotnie szybszy niż człowiek – dlatego dron w trybie Angle wydaje się „magicznie stabilny". Magia kończy się, gdy pętla ma złe parametry PID lub gdy sensor dostarcza błędnych danych.

Trzy warstwy stabilizacji

```
WARSTWY STABILIZACJI (od wewnętrznej do zewnętrznej):
  WARSTWA 1 – ATTITUDE (postawa)
  Żyroskop + akcelerometr → utrzymanie kąta roll/pitch/yaw
  Częstotliwość: 1–8 kHz
  Regulator: PID wewnętrzny (inner loop)
  WARSTWA 2 – VELOCITY (prędkość)
  GPS + optyczny przepływ → utrzymanie prędkości nad ziemią
  Częstotliwość: 50–100 Hz
  Regulator: PID zewnętrzny (outer loop)
  WARSTWA 3 – POSITION (pozycja)
  GPS RTK / standardowy → utrzymanie współrzędnych
  Częstotliwość: 5–10 Hz
  Regulator: GPS/position controller
```

▶ BŁĄD Ś

Operatorzy konfigurujący FC próbują tunować „wszystkie PID naraz".

▶ Prawidłowa kolejność: najpierw wewnętrzna pętla (attitude), potem prędkości, potem pozycji. Tunowanie zewnętrznej pętli bez ustabilizowanej wewnętrznej to budowanie na niestabilnym fundamencie.

5.6 Tryb ACRO – wprowadzenie techniczne

Ponieważ ACRO jest trybem docelowym dla zaawansowanego pilotażu FPV i stanowi fundament rozumienia dynamiki drona, warto poznać jego matematykę na poziomie koncepcyjnym. W trybie ACRO wejście pilota (np. roll stick) definiuje żądaną prędkość kątową (rate):

```
  ω_desired = stick_input · rate_max
   gdzie:
   ω_desired  – żądana prędkość kątowa [°/s]
   stick_input – wychylenie drążka [-1 do +1]
   rate_max   – maksymalna prędkość kątowa [°/s]  (ustawialna
w FC)
   Przykład: stick = 0,5, rate_max = 360°/s
   ω_desired = 0,5 · 360 = 180°/s
```

FC mierzy rzeczywistą prędkość kątową żyroskopem i koryguje silniki, aby osiągnąć ω_desired. Gdy zwolnisz drążek (stick = 0): ω_desired = 0 → FC hamuje obrót → dron zostaje w ostatnim kącie. Typowe wartości rate_max dla różnych zastosowań:

ZASTOSOWANIE	RATE ROLL/PITCH	RATE YAW
Szkolenie (Angle)	N/A	N/A
Freestyle FPV	400–600 °/s	200–300 °/s
Wyścigi FPV	600–900 °/s	300–500 °/s
Cinewhoop (płynny obraz)	200–350 °/s	150–200 °/s
Inspekcja / fotografia	100–200 °/s	80–150 °/s

5.7 Przykłady obliczeniowe

Zadanie 5.2 – wyznaczanie przesunięcia CG

Quadcopter 5", masa 520 g, bateria 190 g, kamera 25 g zamontowana 40 mm przed centrum ramy.

> Moment od kamery:
> $\tau_{camera} = 0{,}025 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}040 = 0{,}0098$ N·m
> Kompensacja przez przesunięcie baterii:
> Odległość baterii za centrum:
> $d_{bat} = \tau_{camera} / (m_{bat} \cdot g) = 0{,}0098 / (0{,}190 \cdot 9{,}81) = 0{,}00526$ m ≈ 5,3 mm
> Wniosek: baterię należy przesunąć 5,3 mm do tyłu od centrum,
> aby skompensować moment kamery.

Zadanie 5.3 – maksymalny kąt i stabilność w trybie

ANGLE

Dron w trybie Angle, ustawiony limit kąta 30°. Pilot trzyma pełny stick roll. T/W = 2.

> Przy kącie 30°:
> $T_z = T \cdot \cos(30°) = 2W \cdot 0{,}866 = 1{,}732W$ (składowa pionowa)
> $T_x = T \cdot \sin(30°) = 2W \cdot 0{,}5 = W$ (składowa pozioma)
> Margines nad ciężarem: $T_z - W = 0{,}732W = 73{,}2\%$
> → Dron nadal wznosi się lub utrzymuje wysokość z dużym marginesem.
> Przy kącie 60° (tryb Acro, pełny roll):
> $T_z = 2W \cdot \cos(60°) = 2W \cdot 0{,}5 = W$
> → Margines = 0: dron nie wznosi się, opada jeśli nie doda throttle.

5.8 Checklista rozdziału

Rozdział 5 – Checklista kompetencji

- [ ] Rozróżniam stabilność statyczną od dynamicznej
- [ ] Potrafię fizycznie wyznaczyć CG i ocenić jego wpływ na lot
- [ ] Znam 4 kanały sterowania i ich mapowanie w MODE 2
- [ ] Rozumiem różnicę między trybami Acro, Angle, Horizon, GPS
- [ ] Wiem, dlaczego tryb GPS nie jest trybem awaryjnym
- [ ] Rozumiem pętlę sprzężenia zwrotnego FC i jej warstwy
- [ ] Potrafię wyjaśnić, dlaczego multirotor jest niestabilny

> statycznie

- [ ] Obliczam korektę CG po dodaniu ładunku
- [ ] Znam typowe wartości rate_max i potrafię je dobrać do

> zastosowania

5.9 Typowe błędy

▶ Nauka wyłącznie w trybie GPS, nigdy w Angle.

> ▶ **BŁĄD P**
> GPS to komfort, nie umiejętność. Operator, który nie potrafi latać w Angle, jest bezradny przy pierwszej awarii GPS lub zakłóceniu magnetycznym.

> ▶ **BŁĄD P**
> **Ignorowanie pozycji CG przy budowie.**
>
> „I tak FC to wyrówna." FC wyrówna, ale kosztem asymetrycznej pracy silników, szybszego zużycia jednej strony układu napędowego i skrócenia czasu lotu.

> ▶ **BŁĄD Ś**
> **Tunowanie zewnętrznej pętli PID bez ustabilizowanej**

▶ wewnętrznej. Jeśli dron oscyluje w Acro (attitude loop), nie próbuj naprawiać tego przez parametry GPS. Tunowanie idzie od środka na zewnątrz, zawsze.

▶ BŁĄD Ś

Zbyt wysokie rate_max w trybie Acro od początku.

Rate 700 °/s dla początkującego ACRO to pewna katastrofa. Zacznij od 300 °/s, opanuj hover i podstawowe manewry, zwiększaj stopniowo.

▶ PUŁAPKA D

Zaufanie do trybu GPS w pobliżu obiektów metalowych i

▶ linii energetycznych. Kompas reaguje na pola magnetyczne. Loty przy infrastrukturze energetycznej, stalowych kładkach lub zbrojonych budynkach mogą powodować dryfowanie pozycji GPS o kilka metrów bez ostrzeżenia.

5.10 Pytania kontrolne

1. Dlaczego multirotor bez aktywnej elektroniki jest statycznie niestabilny? Co by się stało, gdyby FC wyłączył się w locie?

2. Jakie są objawy przesunięcia CG o 20 mm do przodu? Jak FC kompensuje ten błąd i jakie są konsekwencje długoterminowe?

3. Opisz różnicę między trybem Angle a Acro pod kątem zachowania po zwolnieniu drążka roll.

4. Dlaczego szkolenie operatora MUSI obejmować lot w trybie Angle, a nie wyłącznie GPS?

5. Ile warstw stabilizacji ma typowy FC w trybie GPS i jakie sensory obsługują każdą warstwę?

6. Oblicz, o ile należy przesunąć baterię (200 g), aby skompensować kamerę (30 g) zamontowaną 50 mm przed centrum ramy.

7. Dron leci w trybie GPS przy linii wysokiego napięcia. Jakie ryzyko niesie to dla kompasu i jak powinien zachować się operator?

5.11 Mini-test

Pytanie 1. Multirotor bez działającego FC jest:

- A) Stabilny statycznie
- B) Neutralny statycznie

- C) Niestabilny statycznie (poprawna)
- D) Stabilny dynamicznie

Pytanie 2. W trybie ANGLE po zwolnieniu drążka roll dron:

- A) Pozostaje w ostatnim kącie przechylenia
- B) Automatycznie wraca do poziomu (poprawna)
- C) Zaczyna obracać się wokół osi yaw
- D) Przełącza się w tryb ACRO

Pytanie 3. CG przesunięty do przodu powoduje, że:

- A) Dron obraca się w prawo przy gazie
- B) Dron unosi nos – wymaga korekty pitch back
- C) Dron pochyla nos – FC kompensuje stałym offsetem pitch forward

(poprawna)

- D) Dron traci sygnał GPS

Pytanie 4. Pętla żyroskopu w nowoczesnym FC pracuje z częstotliwością:

- A) 50–100 Hz
- B) 500–1000 Hz
- C) 1000–8000 Hz (poprawna)
- D) 32 000–64 000 Hz

Pytanie 5. Tryb GPS jest zawodny w pobliżu infrastruktury energetycznej, ponieważ:

- A) GPS nie działa przy napięciu powyżej 110 kV
- B) Pola magnetyczne linii energetycznych zakłócają kompas, powodując

błędne odczyty pozycji (poprawna)

- C) Silniki elektryczne zagłuszają sygnał satelitarny
- D) Barometr błędnie mierzy wysokość przy turbulencjach

5.12 Najważniejsze wnioski operacyjne

★

> ★ **WNIOSEK 1**
> Multirotor jest z natury niestabilny statycznie. FC to nie "ułatwienie" – to warunek konieczny lotu. Rozumienie tej zasady zmienia podejście do diagnostyki i bezpieczeństwa.
> ★

★ WNIOSEK 2

CG musi być wyznaczony fizycznie po każdej zmianie konfiguracji. Elektroniczna kompensacja przez FC jest dopuszczalna jako korekta, nie jako substytut prawidłowego wyważenia mechanicznego.

★ WNIOSEK 3

Opanuj tryb Angle przed GPS, a Acro przed Angle. Kolejność szkolenia jest odwrócona do kolejności trudności – zaczynasz od trudniejszego, bo to fundament bezpieczeństwa. ★

★ WNIOSEK 4

Pętla stabilizacji FC działa 1000+ razy na sekundę. Jej jakość zależy od kalibracji sensorów i prawidłowego tuningu PID. Nieskalibrowany IMU = niestabilny dron mimo sprawnego sprzętu. ★

★ WNIOSEK 5

GPS to wygoda, nie bezpieczeństwo. Plan awaryjny zawsze zakłada lot w Angle bez GPS. Ćwicz ten scenariusz w symulatorze zanim spotkasz go w rzeczywistości. Źródła do rozdziału 5:

- Mahony, R., Kumar, V., Corke, P. – Multirotor Aerial Vehicles: Modeling,

Estimation, and Control, IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012,

- doi:10.1109/MRA.2012.2206474
- Bouabdallah, S. – Design and control of quadrotors with application to

autonomous flying, EPFL Thesis No. 3727, 2007,

- epfl.ch
- Betaflight Wiki – Flight Modes, Rate Profiles, PID tuning,
- betaflight.com
- ArduPilot Documentation – Flight Modes Overview,
- ardupilot.org
- EASA – Easy Access Rules for UAS, GM1 UAS.OPEN.020,
- easa.europa.eu
- Quan, Q. – Introduction to Multicopter Design and Control, Springer, 2017,

ISBN 978-9811033810

O projekcie e-learningowym

Ten podręcznik jest częścią większego projektu — bezpłatnej platformy e-learningowej dla polskich operatorów i konstruktorów dronów.

Interaktywny kurs, testy, symulatory i materiały wideo — dostępne bez opłat dla każdego w Polsce.

Projekt finansowany społecznościowo; w kolejnym etapie wersje językowe dla innych rynków europejskich.

Kurs

Testy

Symulatory

halaba.online · matthew@halaba.online

Wesprzyj darmowy e-learning o dronach dla Polaków

Bezpłatny kurs online dla każdego
- bez paywall, bez subskrypcji

buycoffee.to/maha

Każda wpłata pomaga uruchomić bezpłatny kurs

— Matthew Halaba

halaba.online · matthew@halaba.online

ROZDZIAŁ 7

Jednostki, skale, przeliczenia i szybkie obliczenia terenowe

Część: I – Fundamenty
Czas nauki szacowany: 90 minut

7.0 Cele szkoleniowe

Po ukończeniu tego rozdziału kursant:

1. Przelicza jednostki prędkości, odległości, masy i temperatury między systemami SI, lotniczym i anglosaskim.
2. Wykonuje szybkie obliczenia terenowe prędkości, zasięgu i czasu lotu bez kalkulatora.
3. Odczytuje skalę mapy i przelicza odległości na terenie.
4. Stosuje reguły szybkiego szacowania do oceny marginesów bezpieczeństwa w warunkach polowych.
5. Identyfikuje i eliminuje błędy jednostkowe w obliczeniach operacyjnych.

7.1 Jednostki SI i lotnicze – przegląd operacyjny

Operator BSP pracuje jednocześnie w kilku systemach jednostek: dokumenty EASA używają SI, oprogramowanie FC podaje prędkości w m/s lub km/h, dane GPS w stopniach i metrach, specyfikacje produktów anglosaskich w calach, funtach i stopach.

Prędkość

Jednostka	Symbol	Przelicznik	Zastosowanie
Metr na sekundę	m/s	—	FC, fizyka, telemetria
Kilometr na godzinę	km/h	1 m/s = 3,6 km/h	Pogoda, mapy drogowe
Węzeł	kt (kn)	1 kt = 0,514 m/s = 1,852 km/h	Lotnictwo, METAR

km/h
1 mph = 0,447 m/s = 1,609
Mila na godzinę mph Sprzęt anglosaski
km/h

Szybkie przeliczniki terenowe (bez kalkulatora):

m/s → km/h: mnóż przez 3,6 (szybko: ×4, potem odejmij 10%)
km/h → m/s: dziel przez 3,6 (szybko: ÷4, potem dodaj 11%)
m/s → kt: mnóż przez 1,94 (szybko: ×2, potem odejmij 3%)
kt → m/s: mnóż przez 0,514 (szybko: ÷2, potem dodaj 3%)
Przykłady:
10 m/s → 10 × 3,6 = 36 km/h
15 kt → 15 × 0,514 = 7,71 m/s ≈ 7,7 m/s
25 km/h → 25 / 3,6 = 6,94 m/s ≈ 6,9 m/s

Odległość

JEDNOSTKA	SYMBOL	PRZELICZNIK	ZASTOSOWANIE
Metr	m	—	Standardowa, FC, EASA
Kilometr	km	1 km = 1000 m	Lotnictwo (pułap), sprzęt Planowanie tras
Stopa	ft	1 ft = 0,3048 m	US
Cal	in	1 in = 25,4 mm	Śmigła, ramy
Mila morska	NM	1 NM = 1852 m	Nawigacja lotnicza
(nautyczna)			
Mila lądowa (statute)	SM	1 SM = 1609 m	Przepisy US

Szybkie przeliczniki terenowe:

metry → stopy: mnóż przez 3,28 (szybko: ×3, potem dodaj 10%)
stopy → metry: mnóż przez 0,305 (szybko: ÷3, potem dodaj 2%)
mile morskie → km: mnóż przez 1,852 (szybko: ×2 - 8%)
Typowe wysokości w locie BSP:
30 m = 98 ft ≈ 100 ft
50 m = 164 ft ≈ 160 ft
100 m = 328 ft ≈ 330 ft
120 m = 394 ft ≈ 400 ft ← limit OPEN A1/A2/A3 (standard)
150 m = 492 ft ≈ 500 ft

Masa i siła

JEDNOSTKA	SYMBOL	PRZELICZNIK	ZASTOSOWANIE
Kilogram	kg	—	MTOM, masa ładunku
Gram	g	1 g = 0,001 kg	Podzespoły, ciąg Ciąg silnika (spec.
Gram-siła	gf	1 gf = 0,00981 N	producenta)
Niuton	N	1 N = 101,97 gf	Obliczenia inżynierskie
Funt	lb	1 lb = 453,6 g = 0,4536 kg	Sprzęt anglosaski
Uncja	oz	1 oz = 28,35 g	Szczegółowe masy

Temperatura

JEDNOSTKA	SYMBOL	PRZELICZNIK
Stopień Celsjusza	°C	— (standard w Polsce i EU)
Kelwin	K	K = °C + 273,15 (obliczenia termodynamiczne)
Stopień Fahrenheita	°F	°F = °C × 1,8 + 32

> Szybkie przeliczenia Celsius ↔ Fahrenheit:
> 0°C = 32°F (zamarzanie)
> 20°C = 68°F (komfortowa temperatura pokojowa)
> -10°C = 14°F (limit LiPo bez ogrzewania)
> -20°C = -4°F (krytyczne chłodzenie ogniw)
> 40°C = 104°F (ryzyko przegrzania elektroniki)

7.2 Przeliczenia terenowe bez kalkulatora

W terenie nie zawsze masz dostęp do smartfona lub kalkulatora. Poniższe metody szybkiego szacowania pozwalają ocenić kluczowe parametry w ciągu kilku sekund.

Reguła „podziel przez 4 i dodaj 10%"

Przeliczenie km/h → m/s:

> Przykład: 72 km/h → ?
> Krok 1: 72 / 4 = 18
> Krok 2: 18 + 10% = 18 + 1,8 = 19,8 m/s
> Wynik dokładny: 72 / 3,6 = 20,0 m/s
> Błąd: 1% – akceptowalny w terenie

Reguła „stopy z głowy"

Przeliczenie metrów → stopy (szybkie):

```
Metoda: m × 3 + m × 0,1 = m × 3,1
Przykład: 120 m → 120 × 3 = 360 + 120 × 0,1 = 12 → 372 ft
Wynik dokładny: 120 × 3,281 = 393,7 ft
Uwaga: ta metoda daje wynik zaniżony o ~6% – stosuj tylko
do szybkiej orientacji, nie do planowania precyzyjnego
```

Reguła 60 – szacowanie czasu przelotu

```
Czas przelotu (minuty) = Odległość (km) / Prędkość (km/min)
Prędkość w km/min = Prędkość (km/h) / 60
Przykład: trasa 4 km, prędkość 36 km/h
Prędkość km/min = 36 / 60 = 0,6 km/min
Czas = 4 / 0,6 = 6,67 min ≈ 6 min 40 s
```

Reguła 1-w-60 (nawigacja)

Klasyczna reguła lotnicza: przy kącie 1° błędu kursu, po 60 jednostkach odległości odchyłka boczna wynosi 1 jednostkę.

```
Odchyłka = (Kąt_błędu / 60) × Odległość
Przykład: dron leci z błędem kursu 5° na trasie 1000 m:
Odchyłka = (5 / 60) × 1000 = 83 m
Wniosek: błąd 5° na dystansie 1 km = 83 m odchyłki bocznej.
Przy misji BVLOS to istotny błąd pozycyjny.
```

7.3 Skale map i przeliczanie dystansów

Typy skal stosowanych w BSP

SKALA	ZASTOSOWANIE	1 CM NA MAPIE =
1:500	Inspekcja budynków, precyzyjna dokumentacja	5 m w terenie
1:1 000	Inspekcja lokalna, plany działek	10 m w terenie
1:5 000	Misje lokalne, miasteczka	50 m w terenie
1:10 000	Standardowe planowanie terenu	100 m w terenie
1:25 000	Mapa topograficzna turystyczna	250 m w terenie
1:50 000	Planowanie tras długodystansowych	500 m w terenie

Przeliczanie odległości z mapy:

```
Odległość_teren = Odległość_mapa × Mianownik_skali
 Przykład: 4,5 cm na mapie 1:25 000
 Odległość = 4,5 × 25 000 = 112 500 cm = 1125 m = 1,125 km
```

Współrzędne GPS – formaty

Operator BSP musi rozumieć trzy podstawowe formaty zapisu współrzędnych GPS:

FORMAT	PRZYKŁAD 50.294400,	STOSOWANY W GOOGLE MAPS, API,
Stopnie dziesiętne (DD)	18.665700	oprogramowanie FC
Stopnie i minuty	50°17.664'N	Mapy lotnicze, aviamaps
dziesiętne (DMM)	18°39.942'E	
Stopnie, minuty, sekundy	50°17'39.8"N	Tradycyjna kartografia
(DMS)	18°39'56.5"E	

Przeliczenie DMS → DD:

```
DD = Stopnie + Minuty/60 + Sekundy/3600
 Przykład: 50°17'39.8"N
 DD = 50 + 17/60 + 39.8/3600
   = 50 + 0.2833 + 0.01106
   = 50.2944°N
```

7.4 Szybkie obliczenia operacyjne – zestawienie

Karta szybkich obliczeń terenowych (do laminowania)

```
┌──────────────────────────────────────────────────────────────────────────────┐
│          KARTA SZYBKICH OBLICZEŃ TERENOWYCH BSP
│
├──────────────────────────────────────────────────────────────────────────────┤
│ PRĘDKOŚĆ
│
│   m/s × 3,6 = km/h       km/h ÷ 3,6 = m/s
│
│   m/s × 1,94 = kt        kt × 0,514 = m/s
│
├──────────────────────────────────────────────────────────────────────────────┤
│ WYSOKOŚĆ
│
│   m × 3,28 = ft          ft × 0,305 = m
│
│   120 m = ~400 ft        30 m = ~100 ft
│
```

```
├──────────────────────────────────────────────────────────────────────┤
│ CZAS LOTU (szybki szacunek)
│
│   t [min] = (C [mAh] × 0,8) / (I_hover [mA] / 1000 × 1000)
│
│   Efektywny czas misji = t_teor × 0,70 × 0,80
│
├──────────────────────────────────────────────────────────────────────┤
│ ZASIĘG
│
│   R [m] = v [m/s] × t_misji [s]
│
│   R z marginesem = R × 0,50 (trasa TAM i Z POWROTEM)
│
├──────────────────────────────────────────────────────────────────────┤
│ REGUŁA 1-W-60
│
│   Odchyłka = (błąd_kursu° / 60) × dystans [m]
│
├──────────────────────────────────────────────────────────────────────┤
│ CIĄG WYMAGANY
│
│   T_min [gf] = MTOM [g] × 2  (T/W = 2)
│
│   T_min [gf] = MTOM [g] × 1,5  (minimum operacyjne)
│
├──────────────────────────────────────────────────────────────────────┤
│ GĘSTOŚĆ POWIETRZA (szybka korekta)
│
│   Co 1000 m MSL ciąg spada o ~8–9%
│
│   1000 m: ×0,912    2000 m: ×0,822    3000 m: ×0,742
│
└──────────────────────────────────────────────────────────────────────┘
```

Przykład obliczeniowy 7.1 – kompletna ocena terenowa

w 2 minuty

Warunki: lot inspekcyjny, wiatr METAR podaje 12 kt, temperatura -5°C, wysokość terenu 600 m MSL. Platforma: MTOM 1200 g, bateria 4S 4000 mAh, I_hover = 9 A, max ciąg 2800 gf.

```
KROK 1 – Przelicz wiatr:
  12 kt × 0,514 = 6,17 m/s ≈ 6,2 m/s
  Limit platformy: 8 m/s → MARGINES: 1,8 m/s → akceptowalny
KROK 2 – Sprawdź T/W przy temp. niskiej:
  LiPo traci ~15% pojemności przy -5°C
  Rzeczywista pojemność: 4000 × 0,85 = 3400 mAh
  Ciąg przy 600 m MSL (×0,948): 2800 × 0,948 = 2654 gf
  T/W = 2654 / 1200 = 2,21 → OK
KROK 3 – Czas lotu:
  t_teor = (3400 × 0,80) / 9000 × 60 = 2720 / 9000 × 60 = 18,1
min
```

t_efektywny = 18,1 × 0,70 × 0,80 = 10,1 min misji
KROK 4 – Zasięg (lot tam i z powrotem, v = 8 m/s):
t_jednej_strony = 10,1 / 2 = 5,05 min = 303 s
R = 8 × 303 = 2424 m = ~2,4 km
WYNIK: lot możliwy, czas misji 10 min, zasięg 2,4 km,
margines wiatru 1,8 m/s. Decyzja: GO z ograniczeniem trasy.

7.5 Typowe błędy jednostkowe

Błędy jednostkowe w obliczeniach operacyjnych BSP są częstą przyczyną pomyłek planistycznych. Poniżej najczęściej spotykane:

▶ BŁĄD P

Podawanie prądu w A zamiast mA przy obliczaniu czasu lotu.

▶ Wzór wymaga spójnych jednostek. Jeśli C w mAh, to I musi być w mA.

BŁĘDNIE: t = 1500 mAh / 3,5 A = 428 h (nonsens)
POPRAWNIE: t = 1500 mAh / 3500 mA = 0,429 h = 25,7 min

▶ BŁĄD P

Mylenie gf z N przy obliczaniu T/W.

▶

BŁĘDNIE: T = 3600 gf, W = 5,1 N → T/W = 3600/5,1 = 706 (nonsens)
POPRAWNIE: T = 3600 gf = 35,32 N → T/W = 35,32/5,1 = 6,92
LUB: T = 3600 gf, W = 520 gf → T/W = 3600/520 = 6,92
Klucz: porównuj te same jednostki.

▶ BŁĄD Ś

Używanie prędkości w km/h we wzorze $D = ½\rho v^2 C_D S$.

Wzór wymaga v w m/s. Wstawienie km/h daje wynik 12,96× za mały.

BŁĘDNIE: v = 36 km/h → D = ½ × 1,225 × 36² × 0,75 × 0,018 = 21,3 N
POPRAWNIE: v = 10 m/s → D = ½ × 1,225 × 100 × 0,75 × 0,018 = 0,83 N
Różnica 25×! Zawsze sprawdź jednostki przed podstawieniem.

▶ Mylenie śmigieł „5 cali" z 5 cm.

▶ **PUŁAPKA S**

Śmigło 5" = 5 × 25,4 mm = 127 mm = 0,127 m. Wstawienie 0,05 m (5 cm) do wzoru na powierzchnię dysku daje wynik 6,45× za mały – błąd w obliczeniach ciągu i mocy.

7.6 Checklista rozdziału

Rozdział 7 – Checklista kompetencji

- [ ] Przeliczam m/s ↔ km/h ↔ kt bez kalkulatora (błąd < 5%)
- [ ] Przeliczam metry ↔ stopy z dokładnością terenową
- [ ] Znam trzy formaty GPS i potrafię przeliczać DMS → DD
- [ ] Stosuję regułę 1-w-60 do szacowania odchyłki kursu
- [ ] Wykonuję 4-krokową ocenę terenową w 2 minuty
- [ ] Znam przelicznik gf ↔ N i stosuję go poprawnie
- [ ] Identyfikuję błędy jednostkowe przed podstawieniem do

> wzorów

- [ ] Korzystam z karty szybkich obliczeń terenowych

7.7 Pytania kontrolne

1. Wiatr METAR podaje 18 kt. Przelicz na m/s i km/h. Czy to mieści się w limicie operacyjnym drona z limitem 10 m/s?

2. Operator stoi na pagórku 80 m n.p.m. Dron leci na wysokości 120 m AGL. Ile to stóp n.p.m.? Ile stóp AGL?

3. Na mapie 1:25 000 zmierzono trasę długości 7,2 cm. Ile kilometrów ma ta trasa w terenie?

4. Dron leci z błędem kursu 3° na trasie 1500 m. Ile wyniesie odchyłka boczna (reguła 1-w-60)?

5. Oblicz czas lotu dla: bateria 6S 5000 mAh, I_hover = 12 A (zapisz prąd poprawnie w mA), η = 0,80, współczynnik dynamiczny 0,70, margines 20%.

6. Producent podaje ciąg silnika 850 gf. Przelicz na Niutony. Dron waży 0,78 kg.

Oblicz T/W dla 4 silników.

7. Dlaczego w formule na opór D = ½ρv²C_D S prędkość musi być w m/s, a nie km/h?

7.8 Mini-test

Pytanie 1. 15 m/s przeliczone na km/h to:

- A) 41,7 km/h
- B) 54,0 km/h (poprawna: 15 × 3,6 = 54)
- C) 29,1 km/h
- D) 90,0 km/h

Pytanie 2. Limit wysokości w kategorii OPEN wynosi standardowo 120 m AGL. To ile stóp?

- A) 300 ft
- B) 328 ft
- C) 394 ft (poprawna: 120 × 3,281 = 393,7 ft ≈ 394 ft)
- D) 450 ft

Pytanie 3. Dron leci z błędem kursu 6° na dystansie 600 m. Odchyłka boczna (reguła 1-w-60) wynosi:

- A) 36 m
- B) 60 m (poprawna: (6/60) × 600 = 60 m)
- C) 100 m
- D) 6 m

Pytanie 4. Bateria 1500 mAh, I_hover = 4,2 A. Prąd w mA to 4200 mA. Czas lotu teoretyczny (η = 0,80) wynosi:

- A) 14,3 min (poprawna: (1500 × 0,80) / 4200 × 60 = 1200/4200 × 60 = 17,1 min)
- B) 17,1 min (poprawna)
- C) 21,4 min
- D) 8,6 min

> Uwaga redakcyjna: prawidłowa odpowiedź to B – 17,1 min. Odpowiedź A jest błędna i służy jako dystraktror przy pominięciu η.

Pytanie 5. Śmigło opisane jako „7 inch" ma średnicę:

- A) 7 mm
- B) 70 mm
- C) 177,8 mm (poprawna: 7 × 25,4 = 177,8 mm)
- D) 7 cm

7.9 Najważniejsze wnioski operacyjne

> ★ **WNIOSEK 1**
> Błąd jednostkowy to cichy zabójca obliczeń. Przed każdym podstawieniem sprawdź, czy wszystkie zmienne są w spójnym układzie jednostek. Jedna pomyłka (km/h zamiast m/s) może dać wynik różny 13-krotnie od rzeczywistości.

> ★ **WNIOSEK 2**
> Karta szybkich obliczeń terenowych – wydrukuj, zalaminuj, noś przy sobie. Ocena marginesy wiatru, czasu lotu i zasięgu w terenie zajmuje 2 minuty i może uchronić przed błędną decyzją GO/NO-GO. ★

> ★ **WNIOSEK 3**
> Reguła 1-w-60 pochodzi z lotnictwa załogowego i działa dla każdego pojazdu powietrznego. Błąd 3° na trasie 1 km to 50 m odchyłki – ważne przy BVLOS i misjach precyzyjnych.

> ★ **WNIOSEK 4**
> Trzy formaty GPS (DD, DMM, DMS) są używane przez różne oprogramowania. Pomyłka formatu przy wpisywaniu waypointa może przenieść dron o dziesiątki lub setki kilometrów. Zawsze weryfikuj format przed zatwierdzeniem misji. ★

> ★ **WNIOSEK 5**
> Korekta gęstości powietrza dla wyższych MSL to nie opcja przy lotach górskich – to obowiązek. Co 1000 m wzwyż tracisz ~9% ciągu. Na 2000 m MSL platforma z T/W = 1,7 może mieć T/W = 1,4 – poniżej bezpiecznego minimum. Źródła do rozdziału 7:

- ICAO Doc 8168 – Aircraft Operations, Appendix: Units of Measurement,
- icao.int
- EASA – Easy Access Rules for UAS, Definitions and Units,
- easa.europa.eu
- Bureau International des Poids et Mesures – The International System of

Units (SI), 9th edition, 2019,

- bipm.org
- Jeppesen – Private Pilot Manual, Chapter on Navigation and Units, Jeppesen

Sanderson 2007

- Skybrary – Navigation: 1-in-60 Rule,
- skybrary.aero
- GPS.gov – GPS Accuracy,
- gps.gov

Wesprzyj darmowy e-learning o dronach

Bez paywall, bez subskrypcji.

buycoffee.to/maha

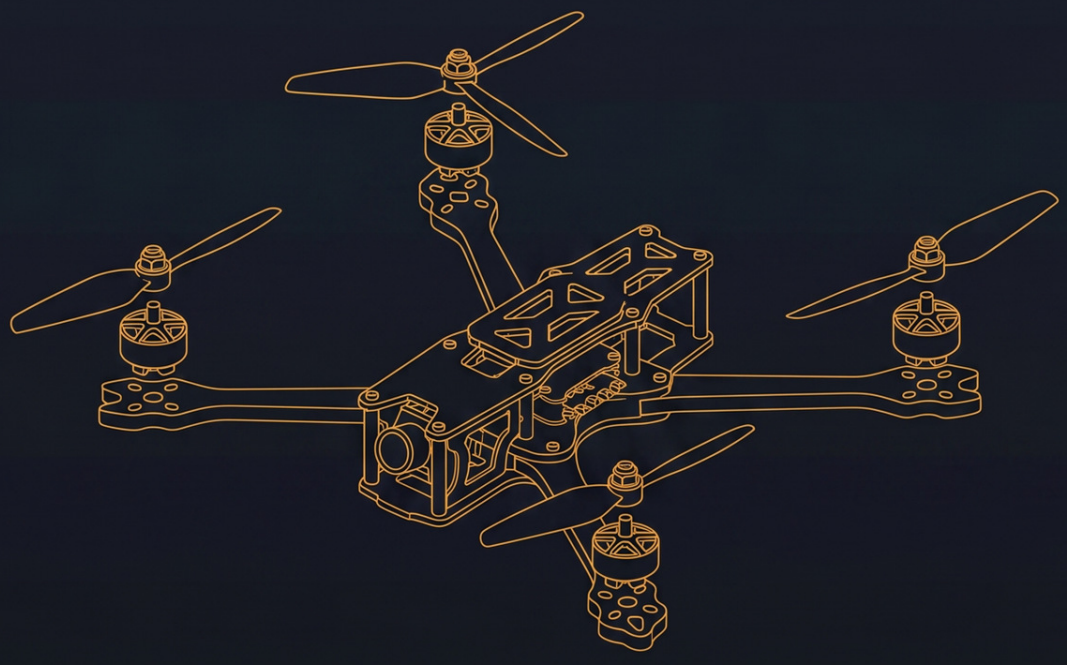
halaba.online

II

CZĘŚĆ II — METEOROLOGIA I ŚRODOWISKO

III

CZĘŚĆ III — BUDOWA DRONA

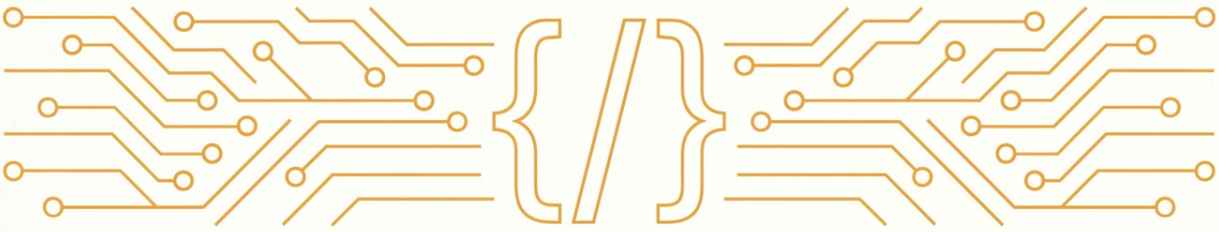


IV

CZĘŚĆ IV — ŁĄCZNOŚĆ, FALA I ZAKŁÓCENIA

V

CZĘŚĆ V — OPROGRAMOWANIE I KONFIGURACJA



VI

CZĘŚĆ VI — OPERACJE LOTNICZE

VII

CZĘŚĆ VII — SERWIS, DIAGNOSTYKA, KPI

VIII

CZĘŚĆ VIII — PRAWO, ETYKA, EGZAMIN KOŃCOWY